Henrique Ajuz Holzmann
Géssica Katalyne Bilcati
(Organizadores)

ENGENHARIAS

desafios e soluções nas múltiplas fronteiras do conhecimento

Atena Editora
Ano 2024

Henrique Ajuz Holzmann
Géssica Katalyne Bilcati
(Organizadores)

ENGENHARIAS

desafios e soluções nas múltiplas fronteiras do conhecimento

Atena
Editora
Ano 2024

CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS

Editora chefe
Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Editora executiva
Natalia Oliveira
Assistente editorial
Flávia Roberta Barão
Bibliotecária
Janaina Ramos
Projeto gráfico
Ellen Andressa Kubisty
Luiza Alves Batista
Nataly Evilin Gayde
Thamires Camili Gayde
Imagens da capa
iStock
Edição de arte
Luiza Alves Batista

2024 *by Atena Editora*
Copyright © Atena Editora
Copyright do texto © 2024 Os autores
Copyright da edição © 2024 Atena Editora
Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.
Open access publication by Atena Editora

Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial
Ciências Exatas e da Terra e Engenharias
Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Colégio Militar Dr. José Aluisio da Silva Luz / Colégio Santa Cruz de Araguaina/TO
Profª Drª Cristina Aledi Felsemburgh – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Diogo Peixoto Cordova – Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Hauster Maximiler Campos de Paula – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco
Profª Drª Jéssica Barbosa da Silva do Nascimento – Universidade Estadual de Santa Cruz
Profª Drª Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Leonardo França da Silva – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Marcos Vinicius Winckler Caldeira – Universidade Federal do Espírito Santo
Profª Drª Maria Iaponeide Fernandes Macêdo – Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas
Profª Drª Mariana Natale Fiorelli Fabiche – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Profª Drª Priscila Natasha Kinas – Universidade do Estado de Santa Catarina
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Rafael Pacheco dos Santos – Universidade do Estado de Santa Catarina
Prof. Dr. Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS

Engenharias: desafios e soluções nas múltiplas fronteiras do conhecimento

Diagramação: Thamires Camili Gayde
Correção: Jeniffer dos Santos
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadores: Henrique Ajuz Holzmann
Géssica Katalyne Bilcati

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharias: desafios e soluções nas múltiplas fronteiras do conhecimento / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, Géssica Katalyne Bilcati. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2024.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-2464-2
DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.642242404

1. Engenharia. I. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). II. Bilcati, Géssica Katalyne (Organizadora). III. Título.

CDD 620

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access, desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce,* ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

APRESENTAÇÃO

Um dos grandes desafios enfrentados atualmente nos mais diversos ramos do conhecimento, é o do saber multidisciplinar, aliando conceitos de diversas áreas. Hoje exige-se que os profissionais saibam transitar entres os conceitos e práticas, tendo um viés humano e técnico.

Neste cenário destaca-se as engenharias, as quais são um dos principais pilares para o setor empresarial. Analisar os campos de atuação, bem como pontos de inserção e melhoria é de grande importância, buscando desenvolver novos métodos e ferramentas para melhoria contínua de processos.

Estudar temas relacionados a engenharia é de grande importância, pois desta maneira pode-se aprimorar os conceitos e aplicar os mesmos de maneira mais eficaz. Destacam-se os assuntos voltados a engenharia do meio ambiente, apresentando processos de recuperação e reaproveitamento de resíduos e uma melhor aplicação dos recursos disponíveis no ambiente, além do panorama sobre novos métodos de obtenção limpa da energia.

O aumento no interesse se dá principalmente pela escassez de matérias primas, a necessidade de novos materiais que possuam melhores características físicas e químicas e a necessidade de reaproveitamento dos resíduos em geral. Além disso a busca pela otimização no desenvolvimento de projetos, leva cada vez mais a simulação de processos, buscando uma redução de custos e de tempo.

De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais.

Henrique Ajuz Holzmann
Géssica Katalyne Bilcati

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 1

OTIMIZAÇÃO DE DESEMPENHO DE EQUIPAMENTO MECÂNICO: APLICAÇÃO DO DMAIC DO LEAN SIX SIGMA PARA PROJETO DE MELHORIA DE MANUTENÇÃO

Brenda Manuely Couto Siqueira
Marcus Renato Pinheiro Mattos

https://doi.org/10.22533/at.ed.6422424041

CAPÍTULO 2 12

INOVAÇÃO E RELACIONAMENTO COM STARTUPS: ANÁLISE DAS CORPORAÇÕES DO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL

Thais Viana Chaves
Paulo Pinheiro Castanheira Neto

https://doi.org/10.22533/at.ed.6422424042

CAPÍTULO 3 38

A ROBÓTICA IMPULSIONADA POR AVANÇOS TECNOLÓGICOS NA EDUCAÇÃO E NA INDÚSTRIA, DESTAQUE PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

Márcio Mendonça
Francisco de Assis Scannavino Junior
João Maurício Hypólito
Iago Maran Machado
Miguel Angel Chincaro Bernuy
Emerson Ravazzi Pires da Silva
Andressa Haiduk
Marcos Antônio de Matos Laia
Fabio Rodrigo Milanez
Michelle Eliza Casagrande Rocha
Janaína Fracaro de Souza Gonçalves
Marcio Jacometti
Fabio Nogueira de Queiroz
Rodrigo Rodrigues Sumar
Edinei Aparecido Furquim dos Santos
Luan Ferreira Pereira
André Luís Shiguemoto
Henrique Cavalieri Agonilha
Henrique Franciz Ximenes de Andrade Bilbao

https://doi.org/10.22533/at.ed.6422424043

CAPÍTULO 4 51

REUTILIZAÇÃO DE CONTAINER MARÍTIMO NA CONSTRUÇÃO DE ESPAÇOS EDUCACIONAIS: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL E INOVADORA

Ivonete Borne
Fabiano Salvadori
Oswaldo Hideo Ando Junior

https://doi.org/10.22533/at.ed.6422424044

CAPÍTULO 5 76

PRECIPITAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO INDUZIDO POR UREASE NA ENGENHARIA CIVIL: UMA REVISÃO INTRODUTÓRIA

Luiza Beatriz Gamboa Araújo Morselli
Jessica Torres dos Santos
Lara Alves Gullo Do Carmo
Julia Kaiane Prates Da Silva
Caroline Menezes Pinheiro
Guilherme Pereira Schoeler
Gustavo Luís Calegaro
Rafael Miritz Bartz
Alessandra Magnus Lazuta
Daniele Martin Sampaio
Pierre-Yves Mahieux
Robson Andreazza

https://doi.org/10.22533/at.ed.6422424045

CAPÍTULO 6 86

REMEDIAÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA DA MINA DE URÂNIO OSAMU UTSUMI (MG) COM BIOCARVÕES EM BARREIRA REATIVA PERMEÁVEL EM LABORATÓRIO

Camila de Campos Souza
Aline Renee Coscione
Heber Luiz Caponi Alberti
Rodrigo Leandro Bonifacio
Ricardo Perobelli Borba

https://doi.org/10.22533/at.ed.6422424046

CAPÍTULO 7 98

A TECNOLOGIA BLOCKCHAIN COMO VIA DE FACILITAÇÃO DAS EXPORTAÇÕES

Daiane Rodrigues dos Santos

https://doi.org/10.22533/at.ed.6422424047

CAPÍTULO 8 123

ANÁLISE DO IMPACTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NA CURVA DE PATO EM UM SISTEMA ELÉTRICO E A UTILIZAÇÃO DE ARMAZENAMENTO COMO MÉTODO DE MITIGAÇÃO

Ana Beatriz Alves
Lucas Feksa Ramos

https://doi.org/10.22533/at.ed.6422424048

CAPÍTULO 9 137

AVANÇOS NA TECNOLOGIA DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO PARA MOBILIDADE ELÉTRICA SUSTENTÁVEL: UM FOCO NA DEGRADAÇÃO

Jordan Passinato Sausen
Bruno Knevitz Hammerschmitt

Marcelo Bruno Capeletti
Joelson Lopes da Paixão
Carlos Henrique Barriquello
Alzenira da Rosa Abaide
Paulo Sérgio Sausen

https://doi.org/10.22533/at.ed.6422424049

CAPÍTULO 10 150

CONTEXTUALIZAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E DE RECARGAS RÁPIDAS EM SISTEMAS DE ENERGIA E ENERGIA RENOVÁVEL

Marcelo Bruno Capeletti
Bruno Knevitz Hammerschmitt
Leonardo Nogueira Fontoura da Silva
Jordan Passinato Sausen
Carlos Henrique Barriquello
Alzenira da Rosa Abaide

https://doi.org/10.22533/at.ed.64224240410

CAPÍTULO 11 160

ANÁLISE DE VAZAMENTO ATRAVÉS DO MEDIDOR ULTRASSÔNICO DIGITAL: ECONOMIA DE ÁGUA ATRAVÉS DO HIDRÔMETRO

Marcos Roberto Ananias

https://doi.org/10.22533/at.ed.64224240411

CAPÍTULO 12 166

LA DESCONTAMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES UTILIZANDO ZEOLITA, COMO SOLUCIÓN DE DESARROLLO LOCAL

Maria Shirlendy Guerrero Alcivar
Olinda Elizabeth Caicedo Arévalo
Lucia Katherine Macias Sánchez
Peter Joshue Navarrete Guerrero
Marjory Elizabeth Caballero Mendoza
Bolívar Humberto Ortega Bravo
María Veneranda Pita Mera
María Belén Lozano Molina
Luzmila Elizabeth Burbano Mera
Galo Arturo Perero Espinoza

https://doi.org/10.22533/at.ed.64224240412

CAPÍTULO 13 185

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ELÉTRICO E MECÂNICO DA LIGA EUTÉTICA DE Al-1,5%Ni TRATADA TERMICAMENTE

Luane Luiza Pereira Marques
Deibson Silva da Costa
Wellington Bruno Silva de Jesus
Héricles Ruiliman Oliveira de Souza
Emerson Rodrigues Prazeres

Otávio Fernandes Lima da Rocha
Maria Adrina Paixão de Souza da Silva
https://doi.org/10.22533/at.ed.64224240413

CAPÍTULO 14 194

ANÁLISE DO RISCO BIOMECÂNICO COM FERRAMENTAS ERGONÔMICAS EM POSTO DE INJEÇÃO PLÁSTICA NO DISTRITO INDUSTRIAL DE MANAUS
Kyssia Roberta Sena Batista de Souza
Neila Newdirley Câmara Pinto
https://doi.org/10.22533/at.ed.64224240414

CAPÍTULO 15 209

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DESCARGA PARA VERTEDORES: ESTUDO EM LABORATÓRIO
Larissa Ayumi Namie
Pedro Henrique Donato Aporta,
Andrea Sartori Jabur
https://doi.org/10.22533/at.ed.64224240415

CAPÍTULO 16 218

EFICIÊNCIA E PERFORMANCE ENTRE RACK PARALELO DE BAIXA TEMPERATURA E UNIDADES *LOW CONDENSING*
Carlos Roberto Inácio
Leandro Dornelas Moura
Alexandre Fernandes Santos
Eliandro Barbosa de Aguiar
https://doi.org/10.22533/at.ed.64224240416

CAPÍTULO 17 236

MODELAGEM DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR TRANSIENTE EM UM MFPL QUE OPERA NO MODO BLOWDOWN
Arthur Durigan Bahdur
Tiago Barbosa de Araújo
https://doi.org/10.22533/at.ed.64224240417

CAPÍTULO 18 247

ANALYSIS OF THE PHYSICAL MODELS USED FOR NUCLEAR CERAMIC FUEL
D. S. Gomes
https://doi.org/10.22533/at.ed.64224240418

CAPÍTULO 19 258

AN INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF TRISO FUEL AND MOLTEN FLUORIDE SALTS
Daniel de Souza Gomes
https://doi.org/10.22533/at.ed.64224240419

CAPÍTULO 20 274

EVOLUTION OF DISPERSED FUEL USED FOR RESEARCH AND TEST REACTORS

D. S. Gomes

https://doi.org/10.22533/at.ed.64224240420

CAPÍTULO 21 286

MODELAGEM DE ENSINO REMOTO PARA AULAS DE PRÉ-CÁLCULO NA ENGENHARIA

Ubirajara Carnevale de Moraes
Vera Lucia Antonio Azevedo

https://doi.org/10.22533/at.ed.64224240421

CAPÍTULO 22 298

O ENSINO DA MATEMÁTICA BÁSICA NOS CURSOS DE ENGENHARIA FLORESTAL CORRELACIONADA COM AS NECESSIDADES DAS EMPRESAS DA ÁREA: ELABORAÇÃO DE MATERIAL DIDÁTICO PARA O ENSINO DE EQUAÇÃO DO PRIMEIRO E SEGUNDO GRAU

Liliana K. J., de MOURA
Willian dos S., RODRIGUES
Juliana P. L. P., dos PASSOS
Luis F. S., VANINI

https://doi.org/10.22533/at.ed.64224240422

CAPÍTULO 23 304

O ESTUDO DO NEUROMARKETING PARA ELABORAÇÃO DE SITES HOSPITALEIROS

Cristina Quitéria de Brito

https://doi.org/10.22533/at.ed.64224240423

CAPÍTULO 24 317

PREPARAÇÃO DE FILMES DE ALGINATO DE SÓDIO E EXTRATO DE KALANCHOE CRENATA (ANDREWS) HAW (SAIÃO) PARA APLICAÇÃO COMO CURATIVO CICATRIZANTE

Marisa Cristina Guimarães Rocha
Joaquim Teixeira de Assis
Nancy Isabel Alvarez Acevedo
Ana Angélica Monteiro de Barros

https://doi.org/10.22533/at.ed.64224240424

SOBRE OS ORGANIZADORES 331

ÍNDICE REMISSIVO 332

CAPÍTULO 1

OTIMIZAÇÃO DE DESEMPENHO DE EQUIPAMENTO MECÂNICO: APLICAÇÃO DO DMAIC DO LEAN SIX SIGMA PARA PROJETO DE MELHORIA DE MANUTENÇÃO

Data de aceite: 01/04/2024

Brenda Manuely Couto Siqueira
Engenharia Mecânica, Centro Universitário do Norte
Manaus - Amazonas
http://lattes.cnpq.br/2627623478557323

Marcus Renato Pinheiro Mattos
Engenharia Mecânica, Centro Universitário do Norte
Manaus - Amazonas
http://lattes.cnpq.br/2890713359271807

RESUMO: Este estudo aborda a problemática do elevado tempo de máquina parada na estação de tensionamento de filme, cujas causas raízes eram desconhecidas. Assim sendo, a busca pelo o aprimoramento do desempenho do equipamento, especificamente visando à redução significativa do tempo de inatividade foi o intuito central da pesquisa, por intermédio das causas principais das paradas na estação, bem como na implementação de melhorias e avaliações do impacto dessas intervenções na eficiência operacional e produtividade. À vista disso, a metodologia adotada foi o ciclo DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*), incorporando ferramentas da qualidade tais como: os "5 Porquês", 5W2H, diagrama de Ishikawa, plano de ação derivado desse diagrama e gráfico de Pareto. Em consequência, a análise desse último destacou o engate do filme no rolete como a principal causa de paradas. Além de que a investigação otimizada revelou que o ajuste inadequado da tensão do filme afetava componentes cruciais, incluindo buchas, molas e a faca tesoura. Ademais, o desgaste do came, resultante da insuficiente inspeção e manutenção, também prejudicava o acionamento da faca tesoura e a lubrificação insatisfatória emergiu como outro fator contribuinte para as paradas. Destarte, a partir da execução do plano de ação foram obtidos resultados satisfatórios, tais como; a diminuição da inatividade das máquinas de 30,85 para 1,73 horas.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização; Equipamento mecânico; DMAIC; Lean Six Sigma; Manutenção.

MECHANICAL EQUIPMENT PERFORMANCE OPTIMIZATION: APPLICATION OF LEAN SIX SIGMA DMAIC FOR MAINTENANCE IMPROVEMENT PROJECT

ABSTRACT: This study addresses the problem of high machine downtime at the film tensioning station, the root causes of which were unknown. Therefore, the search for improving equipment performance, specifically aiming to significantly reduce downtime was the central aim of the research, through the main causes of stoppages at the station, as well as the implementation of improvements and assessments of the impact of these interventions in operational efficiency and productivity. In view of this, the methodology adopted was the DMAIC cycle (Define, Measure, Analyze, Improve, Control), incorporating quality tools such as: the "5 Whys", 5W2H, Ishikawa diagram, action plan derived from this diagram and graph of Pareto. As a result, the latter's analysis highlighted the film's engagement with the roller as the main cause of stoppages. Furthermore, the optimized investigation revealed that improper film tension adjustment affected crucial components, including bushings, springs and the scissor knife. Furthermore, cam wear, resulting from insufficient inspection and maintenance, also hampered the actuation of the scissor knife and unsatisfactory lubrication emerged as another contributing factor to downtime. Thus, from the execution of the action plan, satisfactory results were obtained, such as; the reduction of machine inactivity from 30.85 to 1.73 hours.

KEYWORDS: Optimization; Mechanical Equipment; DMAIC; Lean Six Sigma; Maintenance.

INTRODUÇÃO

A indústria mecânica enfrenta desafios significativos relacionados à disponibilidade de seus equipamentos, notadamente devido a falhas recorrentes que resultam em tempo de máquina parada e impactam diretamente na produtividade. Em consequência disso, tais incidentes acarretam custos elevados de produção e comprometem a qualidade dos produtos, influenciando a competitividade da empresa no mercado. Nesse contexto, a metodologia *Lean Six Sigma* tem se destacado como uma abordagem eficiente para identificar e resolver problemas em processos e equipamentos, visando o aumento da produtividade e a redução de custos (PINTO,2009).

Nessa conformidade, a integração dos princípios *Lean* e das ferramentas *Six Sigma* tem proporcionado resultados positivos, eliminando operações não agregadoras de valor e promovendo a estabilidade nos processos de manufatura enxuta. Além dessas metodologias citadas anteriormente, a metodologia *DMAIC* tem sido amplamente empregada para gestão de projetos de melhoria, demonstrando eficiência na identificação de problemas e busca por soluções. Os Autores Taquetti et al. (2017) e Pereira (2016) ressaltam a aplicação bem-sucedida da metodologia *DMAIC* auxilia na redução de paradas não programadas, evidenciando a eficácia desse método na melhoria contínua dos processos produtivos.

O *DMAIC* possui a etapa de definir, em que se pode encontrar as taxas de paradas não programadas em processos produtivos (BEN-DAYA,2009). As etapas subsequentes, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar, auxiliam na redução do tempo de máquinas paradas,

aumento da produtividade e redução de custos (PYZDEK, 2015). Assim sendo, essas ferramentas de melhoria contínua defendida por Juran (1991) é vital para a sobrevivência empresarial em um mercado globalizado e altamente competitivo. À vista disso, a proposta do trabalho será a aplicacação da metodologia *DEMAIC* com o intuito de identificar problemas e solucioná-los no caso concreto.

METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida na linha de produção de fitas PVC (Policloreto de Vinila) de uma empresa situada no polo industrial de Manaus. Nessa conformidade, a metodologia DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*) foi selecionada para o estudo de caso conforme descrito na Figura 3, a qual é estruturada em cinco etapas para promover a melhoria contínua dos processos os quais podem ser identificados através do fluxograma, Figura 1.

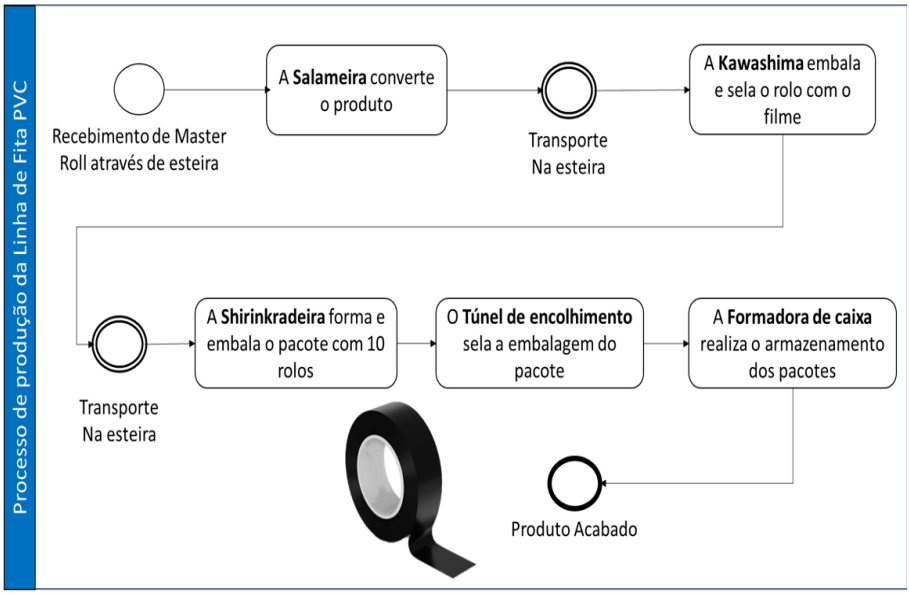


Figura 1 –Fluxo do processo da Linha de Fita PVC.

Fonte: O Autor.

1° Etapa: *Define* (Definir)

Devido ao elevado tempo de inatividade (*Downtime*) na linha da produção da fita PVC, surge o desafio de reduzir esse período de máquina parada, visando a aumentar a disponibilidade dos equipamentos e, consequentemente, atender à elevada demanda de produção. À vista disso, o propósito central consistiu em identificar o principal fator prejudicial

aos equipamentos, a fim de abordar a causa raiz e, assim, prevenir futuros retrabalhos e possíveis desperdícios. Posto isso, uma equipe composta por partes interessadas da organização foi formada para a realização das análises de dados provenientes do sistema de gerenciamento de produção e dos registros de ordens serviçais de manutenção.

2° Etapa: *Measure* (Medir)

Essa etapa focou na mensuração dos fatores que contribuem com as paradas de máquinas como o ponto central a ser abordado, por intermédio da observação do processo, entrevistas individuais com operadores da cadeia produtiva, processos internos bem como softwares de gerenciamento de dados conforme explícito na Figura 2. Além disso, é importante ressaltar que foram utilizadas ferramentas da qualidade para investigar com exatidão o processo.

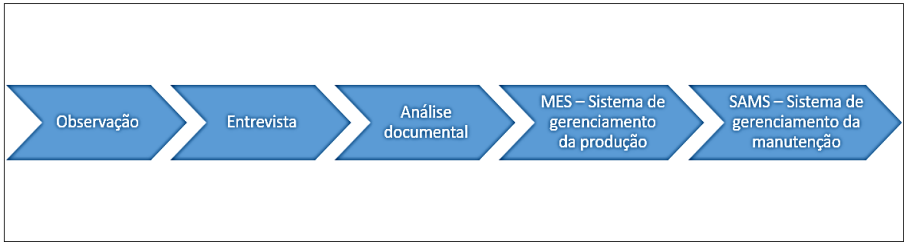


Figura 2 – Fluxo de coleta de dados.

Fonte: O Autor.

3° Etapa: *Analyze* (Analisar)

Nessa etapa, foi desenvolvido um plano de ação para abordar efetivamente o problema e aperfeiçoar o processo que provoca o aumento de tempo de parada de máquina que prejudica a produtividade na linha de fitas de PVC.

4° Etapa: *Improve* (Melhorar)

Nesse estágio, as ações planejadas foram executadas com a implementação de medidas específicas nas variáveis identificadas para eliminar a causa do *downtime.*

5° Etapa: *Control* (Controlar)

Foi iniciada para verificar a eficácia das ações implementadas, realizando uma verificação dimensional do produto e confirmando a eliminação do defeito.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

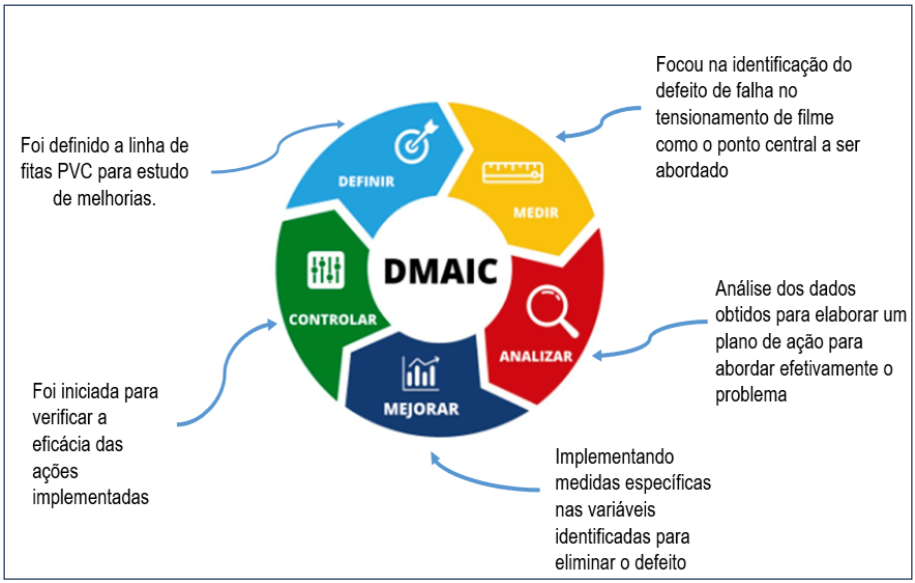


Figura 3 – Fluxo de coleta de dados.

Fonte: O Autor.

Nessa etapa, inicialmente foi identificado que o defeito de falha no tensionamento de filme foi a causa vital para a parada de máquinas na linha de fitas de PVC. Assim sendo, a Figura 3 demonstra como foi aplicado o ciclo DMAIC e consequentemente os resultados a seguir serão abordados e discutidos por intermédio dessa ferramenta.

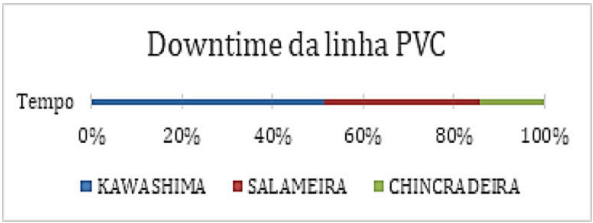


Figura 4 – Distribuição de dowtime na linha PVC de Jan – Out de 2023.

Fonte: O Autor.

D – *DEFINE* (DEFINIR)

A linha de PVC é composta por três equipamentos principais: Salameira, Kawashima e Shirinkradeira. Como observado na Figura 4. Os maiores registros de paradas ocorriam predominantemente na Kawashima, responsável pelo embrulho e selagem do rolo de fita PVC no filme de embalagem.

Figura 5 – Embaladora Kawashima GW-4MC.

Fonte: O Autor.

Nessa conformidade, a Kawashima é um equipamento mecânico composto por acionamento de cames, apresentando um sistema mecânico de tensionamento de filme que estica o material com a assistência de roletes tracionados na base da estrutura de tensionamento, Figura 5.

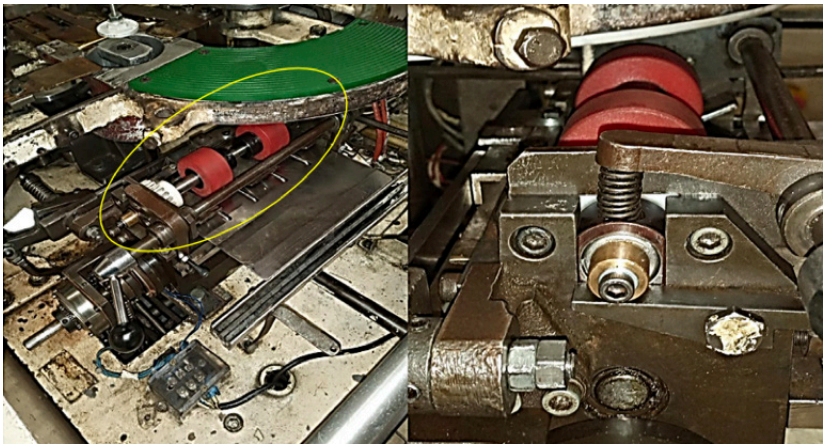


Figura 6 – Roletes embaladora Kawashima GW-4MC.

Fonte: O Autor.

Esses roletes são fixados em um eixo acoplado aos mancais, contando com engrenagens e freio magnético. Subsequentemente, um mecanismo de faca-tesoura entra em ação, cortando o filme de acordo com a medida configurada para envolver perfeitamente o tamanho do rolo, que pode ser de 5m, 10m e 20m. Esse processo é executado de maneira sincronizada com um elevador de rolos, que transporta o rolo para um “prato” equipado com resistências, que sela o filme ao redor do rolo para embalar a fita de forma adequada.

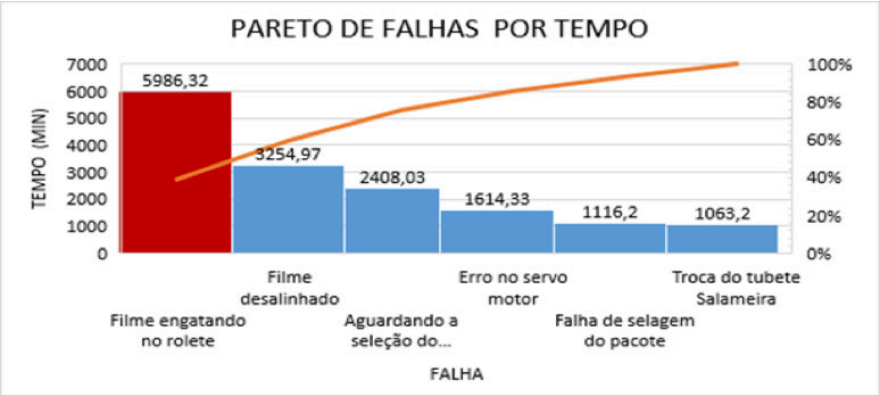


Figura 7 – Pareto de falhas da linha PVC de Jan – Nov de 2022.

Fonte: O Autor.

Assim sendo, é possível inferir que é necessário diminuir esse defeito de tensionamento de filme nessa respectiva máquina por intermédios de ações para atenuar o tempo de parada de máquina.

M – *MEASURE* (MEDIR

Após identificar o equipamento mais crítico (Embaladora Kawashima GW-4MC), o próximo passo consistiu em determinar quais fatores contribuem para o tensionamento do filme, frequentemente apontada pelos operadores, como evidenciado na Figura 7.

É possível inferir que o principal defeito que contribui para o tensionamento do filme é basicamente o engatamento do mesmo no rolete onde observa-se que corresponde à aproximadamente 80% em determinado período de operação do equipamento, Figura 7.

A – *ANALYZE* (ANALISAR)

Assim, foi realizada a análise 5W1H – ferramenta de qualidade – para compreender o impacto dessa avaria, Quadro 01.

5W					1H
O que?	Onde?	Quando?	Quem?	Qual?	Como?
A anomalia é o filme engatando no rolete.	Ocorre na Kawashima, na linha de fita pvc. Especificamente no sistema de tensionamento de filme.	acentuada no início do ano de 2023, principalmente no pico de produção em maio.	Independe do turno e da experiência do operador.	A anomalia passou a ocorrer de forma recorrente.	O filme da embalagem da fita desalinha, engatando no rolete e parando o equipamento.

Quadro 01 – Análise 5W1H da falha “Filme engatando no rolete”

Fonte: O Autor.

Além disso, com o intuito de buscar mais precisão na análise, sucedeu-se um levantamento das possíveis causas para o engatamento do rolete que impacta diretamente no tensionamento do filme, Figura 8.

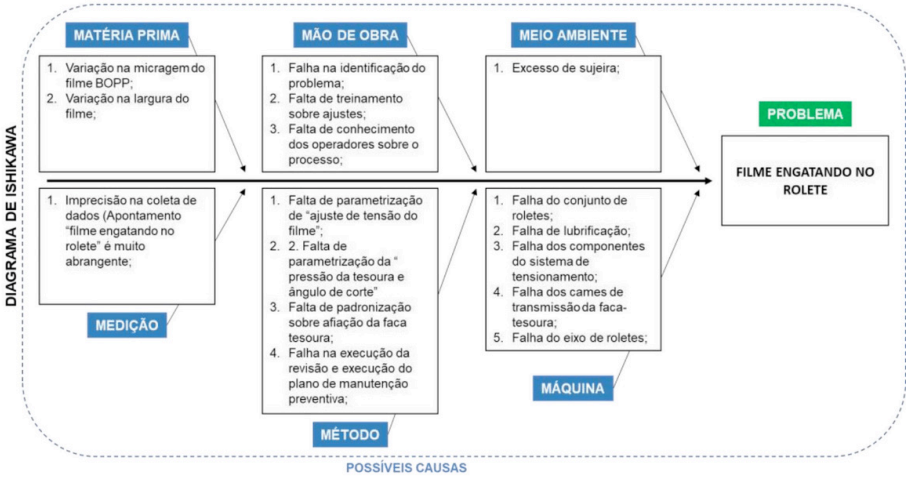


Figura 8 – Diagrama de Ishikawa.

Fonte: O Autor.

Assim, optou-se por priorizar cuidadosamente as quatro principais deficiências escolhidas em consenso: falha dos cames de transmissão da faca tesoura, imprecisão na coleta de dados ("Filme enrolando no rolete"), falha na identificação do filme enrolando no rolete e falha do conjunto de roletes. Nessa conformidade, baseado nessa análise, elaborou-se o seguinte plano de ação, conforme demonstrado no Quadro 4.

Causa Raiz	Ação	Responsável
Falha dos cames de transmissão da faca tesoura	Fazer aquisição e troca do came da tesoura	Manutenção
Falha dos cames de transmissão da faca tesoura	Troca de rolamentos e engrenagens	Manutenção
Imprecisão na coleta de dados "Filme enrolando no rolete"	Coletar históricos de downtime "Filme enrolando no rolete" nos app de produção e estratificar	Facilitador de produção
Imprecisão na coleta de dados "Filme enrolando no rolete"	Fazer melhoria no apontamento do sistema, especificando região dos maiores ofensores	Engenheiro de processo
Falta padrão de "soluções de problemas"	Criar Troubleshooting para "Filme engatando no rolete"	Engenheiro de processo
Falta padrão de "soluções de problemas"	Treinamento operacional do apontamento/Troubleshooting	Engenheiro de processo
Desgaste das buchas do mancal	Fazer aquisição e troca da bucha por rolamentos de agulha	Manutenção
Desgaste das buchas do mancal	Criar conjunto de roletes para backup de troca	Manutenção

Quadro 4 – Plano de ação.

Fonte: O Autor.

I – *IMPROVE* (MELHORAR)

Após a definição do plano de ação, todas as medidas foram implementadas. A melhoria mais significativa foi a fabricação de dois conjuntos de roletes novos, os quais estão ilustrados na Figura 9, apresentando aprimoramentos no tratamento do material, além da substituição da bucha por rolamentos.

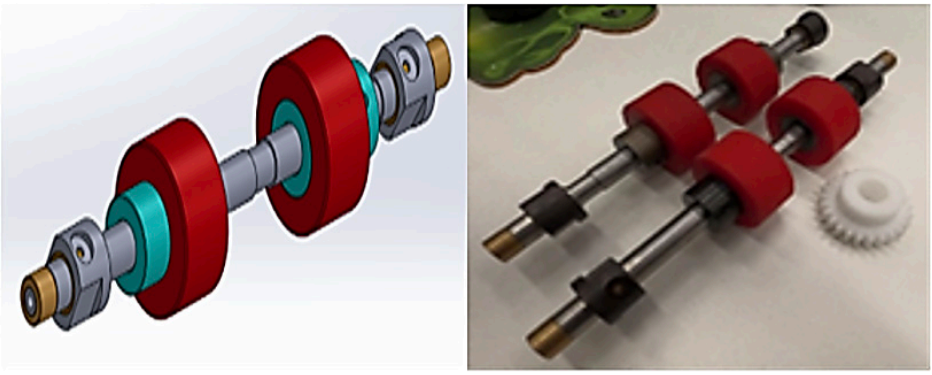


Figura 9 – Conjunto de rolete.

Fonte: O Autor.

C – *CONTROL* (CONTROLAR)

Conforme foram implementadas todas as ações, finalmente, passaram-se onze meses desde o início do projeto de melhoria, Dezembro de 2022. Ao observar a Tabela 1, evidencia-se uma redução significativa tanto no tempo de máquina parada *(Downtime)* da Kawashima quanto no aumento do MTBF (Tempo Médio Entre Falhas).

KAWASHIMA 3											
DESCRIÇÃO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV
QUANTIDADE OCORRÊNCIAS	10	12	10	10	15	16	5	7	2	16	4
DOWNTIME KAWASHIMA	30,85	16,15	16,38	18,37	22,50	16,07	9,35	5,27	1,10	14,13	1,73
DOWNTIME TOTAL	32,77	26,67	35,5	50,05	52,6	68,37	16,3	21,93	8,08	31,48	6,32
MTBF	33,82	28	31	24,83	21,88	17,56	67,64	49,6	144	25,66	50,18
MTTR	2,17	1,15	1,61	1,43	1,39	1,39	2,04	1,29	2,08	1,2	0,62

Tabela 1 – Indicadores da linha PVC.

Fonte: O Autor.

Assim sendo, a Figura 10 descreve também o comportamento decrescente do Downtime da Kawashima após as implementações das melhorias e as oscilações em relação as demais maquinários.

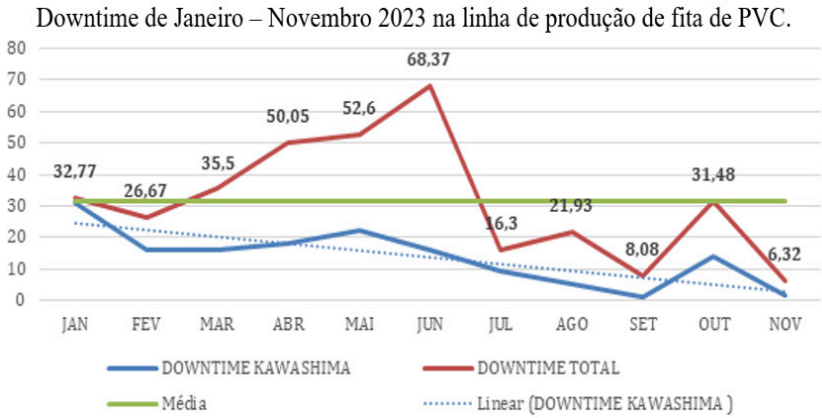


Figura 10 – Downtime linha de PVC.

Fonte: O Autor.

Após a implementação das melhorias propostas no projeto, fez-se necessário estabelecer um sistema de controle para garantir que os resultados fossem mantidos. Assim, uma das funções foi o monitoramento dos indicadores de desempenho, periodicamente, por um período de seis meses após a implementação dos aperfeiçoamentos abordados. Assim, a quantidade de ocorrências de *Downtime* total do equipamento atenuou de 32,77 para 6,32, representando uma redução de 82,2%. O tempo de *Downtime*, especificamente da Kawashima, decresceu de 50,05 para 1,73, representando uma redução de 96,6%. Além disso, o MTBF aumentou de 33,82 para 144, representando um acréscimo de 304,9%. Por fim, o MTTR (tempo médio entre reparos) decaiu de 2,17 para 0,62, representando uma redução de 72,2%.

Dessarte, para garantir que os resultados sejam mantidos, será necessário continuar o monitoramento dos indicadores de desempenho, implementar ações corretivas conforme necessário bem como efetivar um sistema de treinamento para os operadores da linha de PVC.

CONCLUSÃO

O presente estudo delineou um processo estruturado de melhoria, seguindo a metodologia DMAIC, com o objetivo de abordar as falhas críticas em um sistema específico. Inicialmente, durante a fase de diagnóstico, identificou-se o equipamento mais impactante, direcionando o foco para as principais falhas apontadas pelos operadores.

A aplicação da análise 5W1H permitiu desvendar as causas-raiz mais prejudiciais, abrangendo desde a falta de execução da manutenção preventiva até a ausência de padrões de solução de problemas. Com base nessa compreensão aprofundada, foi elaborado um plano de ação que incluiu a confecção de conjuntos de roletes novos, melhorias no tratamento do material e a substituição de buchas por rolamentos.

Ao longo de onze meses após a implementação das ações, os resultados foram consideráveis conforme demonstrado anteriormente evidenciando reduções significativas no tempo de máquina parada e um aumento substancial no MTBF. Nessa conformidade, a implementação eficiente da metodologia DMAIC revelou-se essencial na abordagem sistemática das falhas, promovendo não apenas correções pontuais, mas também as transformações substanciais que impactam positivamente a eficiência operacional e a confiabilidade do sistema em questão. Logo, para garantir que os resultados sejam mantidos, é necessário continuar monitorando os indicadores de desempenho e implementar ações corretivas conforme necessário.

REFERÊNCIAS

BEN-DAYA, Mohamed et al. **"Handbook of Maintenance Management and Engineering".** Londres: Springer, 2009.

JURAN, J. M. **Controle da qualidade**. 4. ed. São Paulo: Makron Books, 1991.

Pereira, H. M. (2016). **Aplicação do lean seis sigma na redução de paradas não programadas em uma empresa de moldagem por injeção**. Monografia (Especialização em Engenharia da Qualidade Lean Seis Sigma Green Belt). Universidade de Taubaté, Taubaté, SP. Disponível em: http://repositorio.unitau.br/jspui/handle/20.500.11874/4993.

PYZDEK, Thomas. **"The Six Sigma Handbook".** Nova York: McGraw-Hill Education, 2015.

PINTO, J. (2009), "Pensamento Lean: A filosofia das organizações vencedoras", Lidel, Lisboa.

TAQUETTI, R. L., et al. **"Integração Lean Six Sigma para Melhoria da Produtividade em uma Linha de Montagem de Produtos Eletrônicos."** Journal of Lean Systems, vol. 2, no. 1, 2017, pp. 47-60

CAPÍTULO 2

INOVAÇÃO E RELACIONAMENTO COM STARTUPS: ANÁLISE DAS CORPORAÇÕES DO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL

Data de aceite: 01/04/2024

Thais Viana Chaves

Paulo Pinheiro Castanheira Neto

RESUMO: Este artigo analisa o cenário de inovação e relacionamento com startups das corporações do setor da construção civil no Brasil, visando compreensão do contexto atual do mercado. Demonstra-se a partir de dados primários e secundários da pesquisa descritiva, ex-post-facto e quantitativa realizada que as 41 empresas analisadas estão bem posicionadas no que diz respeito à inovação e relacionamento com startups dado a média do mercado em geral. Entretanto, sugere-se que futuros estudos, tenham uma diversidade maior de empresas analisadas, principalmente em relação às que não são reconhecidas em premiações por inovarem.

PALAVRAS-CHAVE: Indústria da construção civil; Inovação; Relacionamento com startups.

INNOVATION AND RELATIONSHIP WITH STARTUPS: ANALYSIS OF CORPORATIONS IN THE CIVIL CONSTRUCTION SECTOR IN BRAZIL

ABSTRACT: This article analyzes the scenario of innovation and relationship with startups of corporations in the civil construction sector in Brazil, aiming to understanding the current context of the market. It is demonstrated from primary and secondary data of the descriptive, ex-post-facto and quantitative research carried out that the 41 companies analyzed are well positioned with regard to innovation and relationship with startups given the average of the market in general. However, it is suggested that future studies have a greater diversity of companies analyzed, especially in relation to those that are not recognized in awards for innovating.

KEYWORDS: Civil construction industry; Innovation; Startup engagement.

INTRODUÇÃO

A Indústria da Construção Civil (ICC) por meio de obras de engenharia civil auxiliam no desenvolvimento do bem estar da sociedade com atenção à preservação ambiental. Esta indústria é segmentada de acordo com a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 3 diferentes atividades econômicas. Segundo a Pesquisa Anual da Indústria da Construção (PAIC) o valor gerado em 2019 foi de R$ 288 bilhões em incorporações, obras e/ou serviços da construção (IBGE, 2021).

Em 2021, foram criados 245.939 empregos, ante os 98.000 do ano anterior, totalizando assim com pagamento total de R$56,80 bilhões em salários, retiradas e outras remunerações 1,9 milhões de pessoas ocupadas (Sinduscon-SP; QUINTÃO, 2022; IBGE, 2021). Apesar da geração de empregos, a ICC ainda enfrenta muito preconceito no que diz respeito à presença do sexo feminino no setor. A participação feminina na construção civil é de 10,52% do total de pessoas empregadas. Entretanto espera-se mais com a evolução das tecnologias e da mentalidade da sociedade (DIÁRIO DO COMÉRCIO, 2020).

O setor da construção civil possui diversos impactos ambientais, sendo responsável por cerca de 50% do consumo de todos os recursos naturais disponíveis. Somado a isso, o Brasil recicla menos de 22% do seu potencial de reciclagem de resíduos na construção civil devido à falta de fiscalização. Estima-se que reciclar ou reutilizar os materiais da construção civil é cerca de 40% mais barato do que descartar os resíduos nos locais apropriados (VGRESÍDUOS, 2020).

O produto interno bruto (PIB) da construção civil sentiu os efeitos do COVID-19 e está se recuperando com crescimento 8% em 2021 segundo o Sinduscon-SP e Fundação Getulio Vargas (FGV). Apesar do crescimento nos últimos dois anos, a participação da ICC no PIB do país não recuperou a marca de 13% que chegou a atingir em 2010, seu maior valor desde então (QUINTÃO, 2022).

A PAIC indicou em 2019 o total de 125.067 empresas ativas no setor, uma expansão de 142,42% no período de 12 anos. Sendo assim, progressivamente mais evidente a necessidade de novos desafios e tecnologias, como a adoção de diferentes técnicas construtivas, para as empresas conquistarem espaço no mercado, principalmente com a concorrência acirrada existente (IBGE, 2021; SOUSA, 2015).

Inovação é uma das seis áreas - Infraestrutura; Infraestrutura Urbana; Mercado Imobiliário; Melhores Empregos; Inovação e Tecnologia; e Sustentabilidade - que são necessárias ações para aumentar a eficiência dos recursos investidos na construção civil em busca de posicionamento no mercado (MOURA et al., 2017; STRATEGY&, 2014). Devido às características da indústria e dos projetos, historicamente a inovação na construção tem uma taxa de implementação menor que em outros setores (MOURA, et al, 2019).

A baixa taxa de inovação da ICC quando comparada a outras indústrias, afeta diretamente a performance nos quesitos de funcionalidade, produtividade e qualidade do produto. As peculiaridades do setor e os modelos teóricos subjacentes, entre outras questões, têm sido apontados como as causas desse baixo índice de inovação que por consequência resulta na baixa produtividade do setor (GRADVOHL; FREITAS; HEINECK, 2011).

Um exemplo que corrobora a necessidade da inovação é que apenas 10,4% (52) das companhias americanas que estavam no *ranking* da *Fortune* 500 em 1955 continuaram presentes no *ranking* realizado em 2021. As 448 empresas restantes perderam sua relevância no decorrer das últimas seis décadas, permitindo a ascensão de empresas como Amazon, Facebook, eBay, Home Depot, Microsoft, Google, Netflix, Office Depot, Walmart, CVS Health e Target.

Inovação aberta e engajamento com startups tornou-se um aspecto especialmente importante das estratégias corporativas de inovação, para 39,2% das empresas do mercado inovar é se relacionar com startups. As corporações ao se relacionarem com startups, numa relação de benefício mútuo, podem criar vantagens competitivas que sozinhas não fariam (PERRY, 2021; ACE CORTEX, 2021; KITSUTA, 2021).

REVISÃO DE LITERATURA

Indústria da construção civil

O indicador que mensura a parcela do valor de incorporações, obras e/ou serviços da construção absorvidas pelas oito maiores empresas do setor (R8), 0,0064% do total de empresas do setor, foi de 5,1% em 2019, uma redução de 6,0 p.p em comparação aos 11,1% de 2010. Quando analisados a R8 dos segmentos em particular: (1) Construção de edifícios concentraram 7,2%, redução de 1,7 p.p; (2) Obras de infraestrutura têm-se 11,9%, redução de 13,3 p.p.; e (3) Serviços especializados para construção registrou 7,5%, aumento de 1,00 p.p. (IBGE, 2021).

Reforçando a importantância na economia, o setor imobiliário e construção civil é um dos principais entre as empresas listadas na Bolsa de Valores do Brasil (B3) possuindo mais de 30 empresas imobiliárias e de construção civil listadas, sendo as mais procuradas: Alphaville, Cyrela, Cury, Direcional, Even, EZTEC, Helbor, JHSF, Lavvi, Melnick, Mitre, Moura Dubeux, MRV, Tenda e Trisul (BLOG TORO INVESTIMENTOS, 2022).

Empresas de construção civil podem ser classificadas como conservadoras e avessas ao risco para o desenvolvimento de novas tecnologias. A não mobilidade da produção, a complexidade do processo e a durabilidade do produto são identificadas como características do produto da construção e do processo de produção que limitam o grau de inovação. Desta forma a construção se aproxima a um sistema fechado em que as características da indústria não só não corroboram, como é difícil fugir das mesmas para inovar (BALL, 1999 apud GRADVOHL; NAM; TATUM, 1988 apud GRADVOHL; FREITAS; HEINECK, 2011).

Startups

O Marco Legal das *Startups* diz que são consideradas *startups* as organizações empresariais ou societárias com atuação na inovação aplicada a modelo de negócios sujeito ao Inova Simples, ou declaração, no ato constitutivo, de atuação como modelo de negócio inovador. Essas empresas devem ter receita bruta anual de até R$16 milhões e até dez anos de inscrição no Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica (CNPJ) (GOVERNO DO BRASIL, 2021).

De forma mais usual, pode-se considerar *startup* uma organização temporária formada por grupo de pessoas de perfil empreendedor e autônomo em busca de um modelo de negócios lucrativo, repetível e escalável. Além de estarem inseridos em um cenário de extrema incertezas que requer valor e inovação (RIES, 2012; BLANK; DORF 2014).

Estamos em processo de amadurecimento das *startups*, chegando em 2021 ao patamar de aproximadamente 1000 startups reconhecidas como Unicórnios - startups avaliadas em mais de U$ 1 bilhão - no mundo. No Brasil, a indústria da construção civil há casos de unicórnios como o QuintoAndar, Loft e MadeiraMadeira (*CBINSIGHTS*, 2022).

Quando analisa-se especificamente o setor da construção civil a expectativa é que nos próximos anos ocorra uma forte transformação digital onde as startups possuem um papel importante. Em conformidade com o *Future of Construction* (WORLD ECONOMIC FORUM, 2018), plataforma central para trocar as melhores práticas e ideias orientando o setor de infraestrutura e desenvolvimento urbano em sua transformação e ajudando-o a enfrentar seus principais desafios, as 10 tecnologias digitais mais promissoras para melhorar a produtividade da indústria da construção civil e desenvolvimento urbano são: (1) Pré-Fabricação e Construção Modular; (2) Materiais de construção avançados; (3) Impressão 3D e Manufatura aditiva; (4) Construção autônoma; (5) Realidade aumentada e Virtualização; (6) *Big Data* e Preditiva; (7) Monitoramento sem fio e Equipamentos conectados; (8) Nuvem e Colaboração em tempo real; (9) Escaneamento 3D e Fotogrametria; e (10) Modelagem de informações de construção (BIM).

Desde 2017 a Terracotta Ventures, empresa de venture capital que busca fomentar a inovação na cadeia construtiva por meio do investimento em *construtechs, startups* relacionadas ao ambiente de construção, e *proptechs*, *startups* que atuam com tecnologia para propriedade, realiza o Mapa de *Construtechs* e *Proptechs* com maior cobertura do ecossistema de *startups* do segmento da ICC no Brasil. Em 2021, mapearam 839 startups ativas atuando ao longo de todo ciclo de projetos, construção, aquisição e propriedades em uso. O que representa um crescimento de 235,6% nos últimos cinco anos no número de *startups* ativas atuando no setor.

Observa-se o crescimento acelerado movimento no número de startups no setor, o que favorece as corporações que possuam iniciativas estruturadas de engajamento com startups. A transformação digital foi catalisador desse aumento devido à demanda de novas tecnologias e agilidade para solução de desafios (KITSUTA, 2021).

Inovação

A inovação é um instrumento no qual empreendedores buscam uma oportunidade, que surge através do anseio por mudanças, com objetivo de diferenciar um serviço ou um negócio (DRUCKER, 1986). O livro o Dilema da Inovação traz que a inovação tem objetivo de obter produtos ou serviços de maior valor advindos da transformação de capital, matéria-prima, informação ou trabalho. Para isso, usa-se a alteração dos processos organizacionais (CHRISTENSEN, 2012).

Já o manual de inovação do Movimento Brasil Competitivo (2008, p. 6) define inovação tecnológica como:

> "resultado da aplicação de conhecimentos novos, obtidos através da pesquisa científica aplicada a produtos ou processos de produção, com novas funcionalidades e efetivos ganhos de qualidade ou produtividade, resultando em maior competitividade".

De acordo com Hamel e Prahalad (1995), inovar é adotar novas tecnologias, que aumentam a competitividade da companhia. A busca por diferencial é impulsionada pela competitividade existente no mercado, a partir da inovação as empresas podem se manter competitivas e com destaque no mercado. (SOUZA, 2015).

Segundo o ACE Innovation Survey o conceito de inovação está atrelado a principalmente disrupção de mercado (61,6%) com a criação de novos modelos de negócios, produtos e serviços que atendem a uma necessidade dos consumidores. No segmento da construção apenas 12,50% acreditam que estão sofrendo uma disrupção por tecnologias emergentes, uma redução de 49,1 p.p em relação ao cenário geral (ACE CORTEX, 2021).

Referenciais mais modernos, como o Report Hubs e Labs de Inovação (ACE CORTEX, 2022), há um terceiro modelo de inovação que mescla a Inovação Aberta com a Inovação Fechada. A Inovação Mista ao mesmo tempo em que a empresa possui iniciativas voltadas para a resolução de seus desafios de negócios com agentes externos (Modelo Inovação Aberta), a companhia também desenvolve programas internos (Modelo Inovação Fechada) para a geração, desenvolvimento e experimentação de novas teses de negócios, fenômeno também conhecido como intraempreendedorismo (SHARMA; CHRISMAN, 1999).

Apesar dos três modelos serem igualmente efetivos para a transformação cultural e digital das empresas, a Inovação Aberta tem ganhado muita tração no mercado, 47,2% das empresas possuem programas de inovação aberta e 44% programas de Intraempreendedorismo (ACE CORTEX, 2022), sendo adotada por diversas companhias como filosofia no início de sua jornada de inovação corporativa. Os motivos para essa movimentação vão desde as questões operacionais até as financeiras.

Segundo levantamento feito com os principais Hubs de Inovação do Brasil a estratégia, gestão e cultura são pilares condicionantes na decisão da alta liderança pelo modelo de inovação - Aberta, Mista ou Fechada - adequado (ACE CORTEX, 2022):

→ A estratégia leva em consideração os planos e ações do momento atual da companhia, assim como mapeiam novas oportunidades de negócios no curto, médio e longo prazo.

→ A gestão envolve todas as melhores práticas e processos necessários para que se tenha sucesso em promover conexões e estimular a inovação em todos os níveis hierárquicos das organizações;

→ A cultura diz respeito aos princípios de transformação dos valores e hábitos enraizados na operação das companhias. Quanto a corporação coopera para desenvolver novas soluções e promovê-las no mercado.

De acordo com o Manual de Oslo (OCDE, 2005), competências estratégicas- antecipar tendências de mercado - e organizacionais - disposição para o risco e cooperação externas - são as características determinantes para a definição de uma empresa inovadora. Similarmente, são fatores essenciais para o benefício mútuo entre as corporações e startups no engajamento de inovação aberta.

Relacionamento das corporações com startups

As relações entre corporações e startups não são o tipo mais natural de colaboração, pois os recursos, capacidades e estilo de gestão são diferentes (MINSHALL; MORTARA; ELIA; PROBERT, 2008; TYLER; STEENSMA, 1995) são diferenças relevantes entre as partes envolvidas. Os *insights* divulgados pela 100 *Open Startups* em relação ao *Ranking* "TOP 100 Corps" de 2021 mostram que o número de empresas que praticam inovação aberta cresceu 3965,85% em relação a 2016.

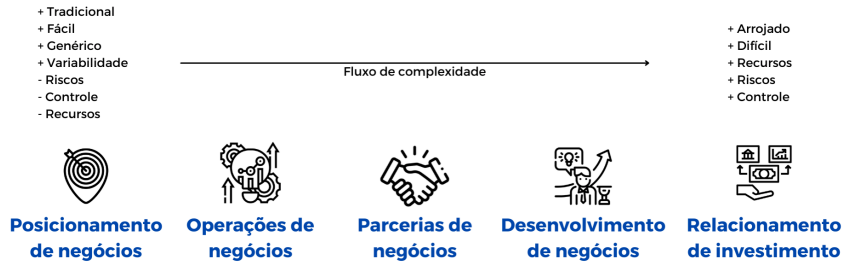
Na Edição de 2021 do *Ranking* houve uma pesquisa com 9.779 executivos sobre os motivos pelos quais as empresas buscam por *startups*, onde 84,3% disse que procuram soluções inovadoras para oportunidades em sua empresa.

A escolha do modo de engajamento está inserida em um contexto específico. Inovação aberta envolve altos níveis de incerteza, especialmente nos estágios iniciais de desenvolvimento. Há mais de 20 veículos de inovação, sendo uma grande variedade de formatos ou programas que podem ser implementados para desenvolver a transformação que a empresa almeja alcançar (SBAMPATO, 2020).

Cada veículo possui um nível de complexidade, com exigências diferentes, tanto em nível de investimento, quanto em número de colaboradores. Faz-se necessário encontrar o modo de engajamento que se alinhe com o objetivo estratégico de ambas as partes, de maneira que renda os melhores benefícios (WEIBLEN E CHESBROUGH, 2015).

Os modos de engajamento no relacionamento de corporações e startups podem ser aglomerados em cinco grupos de diferente fluxo de complexidade, exemplificado no infográfico 1: (1) Posicionamento de Negócios, diz respeito ao posicionamento da corporação no mercado e suas formas de apresentação; (2) Operações de Negócios,

trata-se das práticas internas da organização para o externo no que tange às práticas de inovação; (3) Parcerias de Negócios, entende-se como as interfaces de colaboração no ambiente externo à organização; (4) Desenvolvimento de Negócios, são práticas de fomento e/ou expansão da capacidade das partes envolvidas; e (5) Relacionamento de Investimentos, envolve ações de compra, venda, união, entre outros (SBAMPATO, 2020).

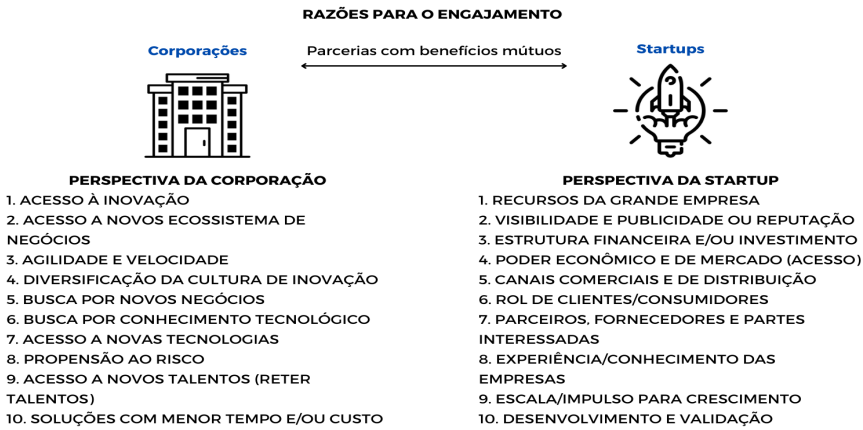


Infográfico 1. Modos de engajamento das corporações com as startups

Fonte: A autora, 2022. A partir de dados do Sbampato (2020)

Complementar aos cinco grupos de trabalho, é essencial a compreensão em especial das 5 iniciativas de interação com startups que são comuns as corporações no mercado descritas a seguir, pois são tratadas nos resultados da pesquisa ao realizar a análise das corporações do setor da construção civil: incubação de Startups, aceleração de Starups, contratação de serviços; investimentos e aquisições.

De maneira a enriquecer o entendimento os infográficos 2 e 3, baseados na revisão sistemática da literatura de Sbampato (2020), em que analisou mais de setenta documentos, traz as 10 principais razões, dificuldades e riscos no relacionamento corporativo com startups na perspectiva de ambas as partes:



Infográfico 2. Razões para o engajamento pela perspectiva da corporação e startup

Fonte: A autora, 2022. A partir de dados do Sbampato (2020)

Infográfico 3. Dificuldades das corporações e riscos das startups

Fonte: A autora, 2022. A partir de dados do Sbampato (2020)

Cases das corporações do setor da construção civil no Brasil

Ainda há uma grande dispersão no que diz respeito à inovação aberta entre os setores das empresas brasileiras. Os três principais segmentos que realizam engajamento corporativo com startups são “Serviços Profissionais” (14,95%), “Varejo e Distribuição” (10,51%) e “Bens de Consumo e Alimentação” (9,58%). Sendo a categoria “Construção Civil” em 8º lugar com 5,02% (RONDANI et al, 2021).

Apesar disso, o Brasil apresenta grandes empresas que se posicionam publicamente com iniciativas e estratégias de inovação com startups, sendo possivel observar cases de sucesso como a colaboração da Prefeitura de São Paulo, AMBEV, Gerdau, Hospital Israelita Albert Einstein e Brasil ao Cubo (startup de construção modular) que deram a velocidade necessária para a entrega de um novo Centro de Tratamento para a COVID-19, com 100 leitos para atendimento do público do Sistema Único de Saúde (GERDAU, 2020). A partir disso, há demanda por premiações de corporações do setor da construção civil em relação a inovação e interação com startups, como por exemplo o Prêmio Valor Inovação Brasil da Strategy& e o jornal Valor Econômico que reconhece empresas da Construção e Engenharia, Infraestrutura e Materias de Construção e Acabamento e o Ranking 100 Open Corps para o segmento da construção civil.

O Mapa das *Construtechs* e *Proptechs* de 2021 da Terracotta Ventures contam com 18 *Corporate Startups* que são iniciativas criadas por corporações da ICC que buscam desenvolver novas unidades de negócio e apostam na criação de *startups* como forma de validar novos modelos de negócio com potencial alto crescimento e escalabilidade.

ANÁLISE DAS CORPORAÇÕES DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL REFERENTE À INOVAÇÃO E RELACIONAMENTO COM STARTUPS

Como técnica de padronização de coleta de dados, foi elaborada a pesquisa via formulário com 16 questões de múltipla escolha limitada ou nível na escala de 1 a 10, a fim de realizar a análise das corporações da ICC referente a inovação e relacionamento com startups. Os resultados obtidos, são expostos a seguir em três seções.

Durante a análise de resultados deste trabalho, realizou-se comparativos de mercado com o ACE Innovation Survey (ACE CORTEX, 2021) e Construção do Amanhã (DELOITTE, 2020).

Mapeamento do perfil dos respondentes

O levantamento colheu dados acerca de 41 organizações e seus processos de inovação por meio de óticas diferentes, passando por todos os níveis hierárquicos das companhias. Em relação ao cargo na respectiva empresa, obtemos que 24,39% dos respondentes exercem o papel de "Coordenador (a) ou Supervisor (a)", seguidos por "Especialista" e "Diretor (a) ou *Head*" empatados com 14,63% e dividindo o terceiro lugar os cargos de "Gerente" e "Analista ou Assistente" representando 12,20% do total. Cargos como "Estagiária (o)", "Engenheiro" e "Consultor" representam 4,88% cada, as demais funções somam 7,32%.

A pesquisa conta com 78,05% dos respondentes em empresas cuja matriz é da Região Sudeste, seguidos por 12,20% na Região Sul, 4,88% da Região Nordeste e 2,44% da Região Centro Oeste. Não houve adesão de 100% do Brasil, visto que nenhum respondente tinha matriz da corporação na Região Norte. Todavia, houve um respondente cuja matriz é de fora do Brasil (Estados Unidos da América - EUA), porém, possuem operação no Brasil (Infográfico 4).

Infográfico 4. Região da matriz das empresas respondentes

Fonte: A autora, 2022.

A concentração da participação das regiões do Brasil nos valores de cada segmento e pessoal ocupado, segue o padrão da pesquisa PAIC 2019, feita pelo IBGE (2021 onde expuseram a predominância da Região Sudeste com 49,6% do valor de incorporações, obras e/ou serviços da construção e 49,3% da composição dos trabalhadores da construção no Brasil.

O segmento "Construção de Edificações" foi o segmento líder da pesquisa com 51,22% dos respondentes e "Obras de Infraestruturas" em sequência com 19,51% do total. Em último, empatados temos os segmentos de "Serviços Especializados para Construção" e "Materiais de construção ou fornecedores" com 12,20%. Seguindo a mesma concentração de valor gerado entre os setores com Construção de edifícios (R$ 127,3 bilhões), seguido de Obras de infraestrutura (R$ 92,8 bilhões) e Serviços especializados para construção (R$ 67,9 bilhões) (IBGE, 2021).

Além disso, apesar de 56,25% das empresas da Região Sudeste serem do segmento da Construção de Edificações, a região foi a única a apresentar ao menos uma empresa de cada segmento da ICC.

Conforme o Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES, 2018), a classificação de 73,17% das empresas contempladas na pesquisa em relação a Receita Operacional Bruta ou Renda Anual são de Grande Porte (Faturamento maior que R$ 300 milhões), 19,51% reconhecidos como média Porte (Faturamento maior que R$ 4,8 milhões e menor ou igual a R$ 300 milhões) e outros 7,32% são de Pequeno Porte (Faturamento maior que R$ 360 mil e menor ou igual a R$ 4,8 milhões). A pesquisa não recebeu nenhuma resposta de Microempresa - Faturamento menor ou igual a R$ 360 mil.

Diferente dos segmentos de “Obras de Infraestruturas”, “Serviços Especializados para Construção” e “Construção de Edificações” que apresentam empresas de todos os portes - com exceção de microempresas -, todas as empresas respondentes dos segmentos de “Materiais de construção ou fornecedores” e “Consultoria Imobiliária” são de Grande Porte.

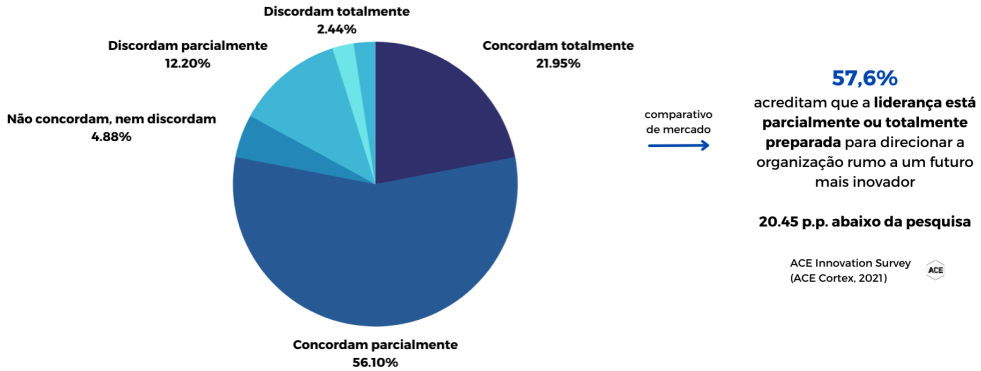
Cenário inovação das empresas brasileiras de construção civil

Todos os 41 respondentes da pesquisa, passaram pela segunda seção que busca compreender o cenário geral de inovação das empresas brasileiras de Construção Civil direcionado por três questões: (1) Se as lideranças estão preparadas para inovar; (2) Se inovação é uma prioridade para empresa; e (3) Se há time dedicado a inovação.

As lideranças estão preparadas para inovar?

De modo otimista, 78,05% dos respondentes desta pesquisa concordam parcialmente (56,10%) ou totalmente (21,95%) que as lideranças estão preparadas para direcionar a organização rumo a um futuro mais inovador para levar a companhia para um patamar mais disruptivo em seus negócios. Seguidos por 12,20% dos respondentes discordando parcialmente, 4,88% não concordando, nem discordando e outros empatados com 2,44% cada que discordam totalmente ou não sabem dizer.

No comparativo de mercado com o ACE Innovation Survey (ACE CORTEX, 2021), mais da metade (57,6%) dos representantes acreditam que a liderança está parcialmente ou totalmente preparada para direcionar a organização rumo a um futuro mais inovador. O que representa uma redução de 20,45 p.p. em relação ao resultado da pesquisa realizada com a ICC (Infográfico 5).



Infográfico 5. Se as lideranças estão preparadas para inovar

Fonte: A autora, 2022.

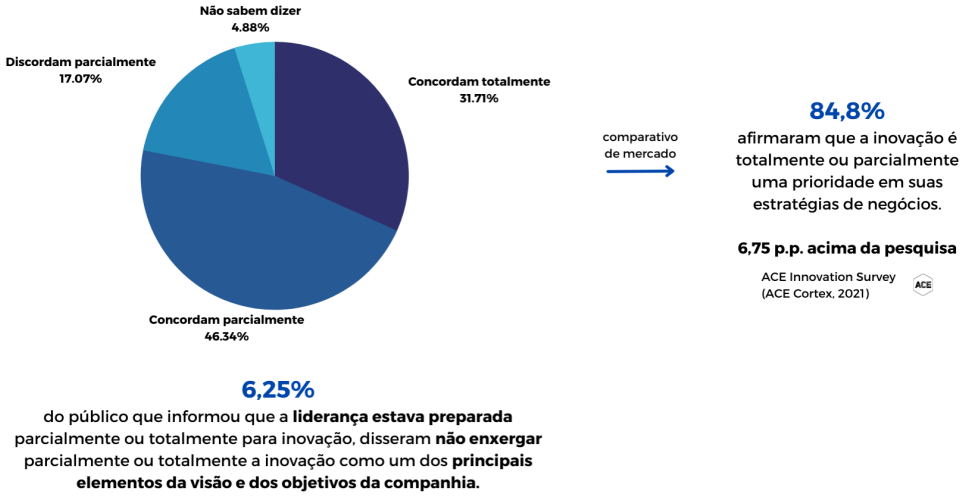
A inovação é uma prioridade para corporação?

Em relação a importância da inovação nas empresas, 78,05% dos respondentes concordam parcialmente (46,34%) ou totalmente (31,71%) que inovação é uma prioridade dentro da corporação. O percentual visto anteriormente em relação à percepção dos líderes que estão preparados para estruturar a inovação em suas empresas é exatamente igual ao percentual de priorização da inovação nas empresas.

Além disso, 17,07% dos respondentes discordam parcialmente que as empresas reconhecem a importância da disrupção do próprio modelo de negócios e outros 4,88% não sabem dizer sobre a estratégia da corporação.

Ressalta-se, que 6,25% do público que informou que a liderança estava preparada parcialmente ou totalmente para inovação, disseram não enxergar parcialmente ou totalmente a inovação como um dos principais elementos da visão e dos objetivos da companhia.

No infográfico 6, quando comparado ao ACE Innovation Survey (ACE CORTEX, 2021) há um aumento de 6,75 p.p. dos respondentes que afirmam que a inovação é totalmente ou parcialmente uma prioridade em suas estratégias de negócios (84,8%). Somado a isso, 54% das corporações da construção civil possuem uma estratégia de inovação definida (DELOITTE, 2020).



Infográfico 6. Se inovação é uma prioridade para empresa

Fonte: A autora, 2022.

Há um time dedicado à inovação?

Por fim, quando questionados se havia um time dedicado à inovação na empresa, 73,17% dos respondentes informaram que sim. De forma curiosa, 9,76% dos que informaram que a companhia tem um time dedicado à inovação, discordam parcialmente, totalmente ou não concordam e nem discordam quando questionados se liderança está pronta para inovação ou se inovação é uma prioridade na empresa.

Na Construção do Amanhã (DELOITTE, 2020) quatro em cada dez corporações, das 241 empresas de diversas atividades do setor analisadas, têm uma equipe responsável por inovação, 32,71 p.p. abaixo da presente pesquisa (infográfico 7).

Infográfico 7. Se há time dedicado a inovação

Fonte: A autora, 2022.

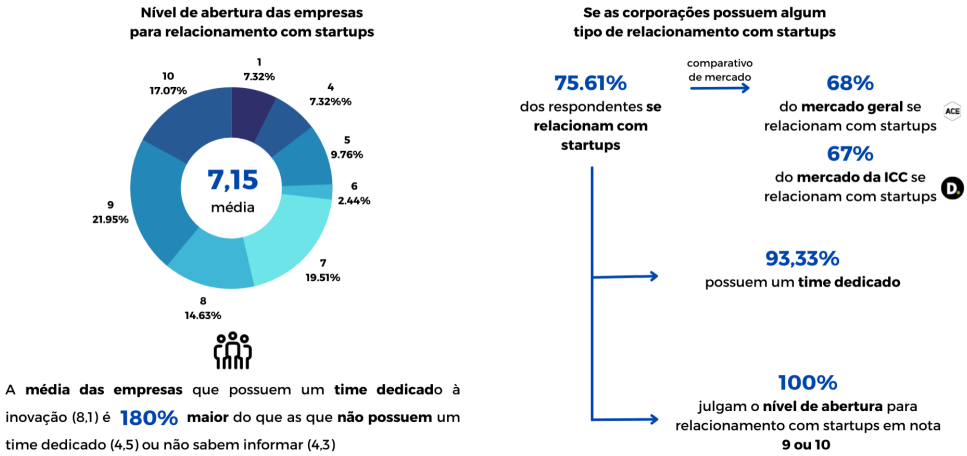
Cenário de relacionamento das corporações brasileiras de construção civil com startups

A cada ano, mais empresas e startups se relacionam entre si por meio da inovação aberta. Em 2021, 3334 empresas se relacionaram com 1751 startups no Brasil. Crescimento de 3965,85% no número de empresas e 1526,85% em relação às startups quando comparado a 2016 (RONDANI et al, 2021), o ritmo de entrada de novas empresas na inovação aberta vem sendo ainda mais acelerado do que o das startups, por diversas razões estratégicas como inovação corporativa, dinâmicas de mercado, intraempreendedorismo.

Contudo, a pontuação média no que diz respeito ao nível de abertura das corporações analisadas no presente estudo para o relacionamento com startups foi 7,15 de 10. Temos que 53,66% das empresas estão acima da média com nível 10 (17,07%), 9 (21,95%) ou 8 (14,63%). A média das empresas que possuem um time dedicado à inovação (8,1) é 180% maior do que as que não possuem um time dedicado (4,5) ou não sabem informar (4,3).

Somado a isso, 75,61% das corporações analisadas neste trabalho possuem algum tipo de engajamento com startups. Ainda que em referências externas, esse número seja inferior, 68% das empresas de diversos mercados (ACE CORTEX, 2021) e 67% das empresas da construção civil (DELOITTE, 2020) têm algum tipo de interação com startups.

Das corporações compreendidas nessa pesquisa que possuem relacionamento com startups (75,61%), 93,33% possui um time dedicado à inovação. Junto a isso, 100% das empresas que julgam o nível de abertura para relacionamento com startups em nota 9 ou 10 possuem alguma interação com startups (infográfico 8).



Infográfico 8. Cenário de relacionamento das empresas brasileiras de Construção Civil com startups

Fonte: A autora, 2022.

Apenas os 31 respondentes da pesquisa que possuem algum tipo de interação com startups (75,61%), passaram pela terceira, e última, seção que busca compreender o cenário de relacionamento das corporações brasileiras de Construção Civil com startups. Todas as questões a seguir, foram formuladas com possibilidade de escolha de mais de uma opção, sendo as questões referentes aos objetivos, desafios, benefícios e fatores que auxiliam com limite de 3 escolhas. Assim, os resultados de cada questão somam porcentagens superiores aos 100%, pois representam a maior ocorrência de cada variável.

Quem são os responsáveis pelas interações do relacionamento com startups?

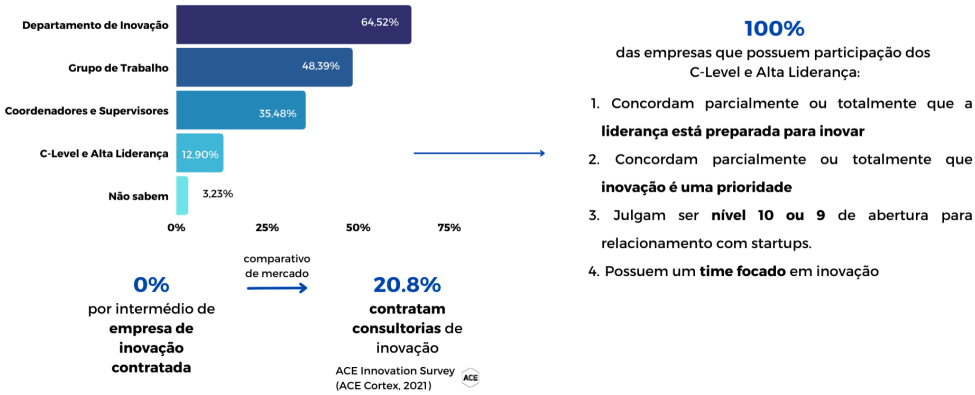
Habitualmente o caminho da inovação tem um sentido de cima para baixo nos negócios, o que mostra uma urgência por inovação partindo da alta liderança, como das companhias (ACE CORTEX, 2021).

Contudo, os responsáveis pelas interações do relacionamento com startups das corporações analisadas neste trabalho, frequentemente são os departamentos de inovação da companhia (64,52%), grupo de trabalho específico (48,39%), Coordenadores e supervisores dos departamentos representam (35,48%) e apenas 12,90% das empresas possuem participação da alta liderança, sendo em um único caso o responsável exclusivo.

De modo indagador, nenhuma das empresas alcançadas nessa pesquisa trabalham com terceirização dos serviços por intermédio de empresa de inovação contratada. No mercado em geral, cerca de 20,8% das empresas contratam consultorias de inovação (ACE, 2021).

Das empresas que contam com o envolvimento do C-Level e a Alta liderança na interação com startups, 100% concordam parcialmente ou totalmente que a liderança está preparada para inovar e que inovação é uma prioridade na companhia. Além disso, 100%

dessas empresas possuem um time focado em inovação e julgam ser nível 10 ou 9 de abertura para relacionamento com startups, sendo a escala de 1 a 10 (Infográfico 9).



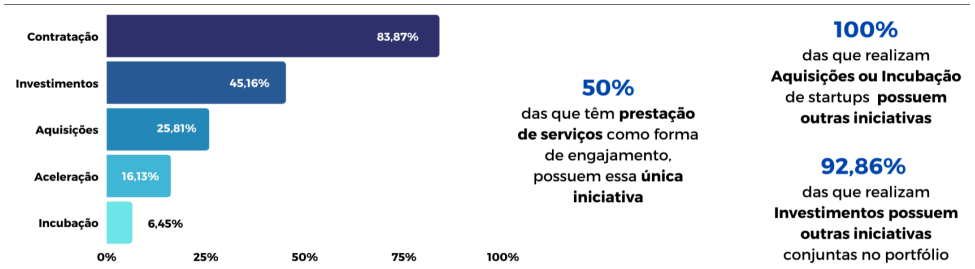
Infográfico 9. Responsáveis pelas interações do relacionamento com startups

Fonte: A autora, 2022.

Quais são os tipos de relacionamento com startups praticados?

A forma mais comum das corporações presentes na pesquisa é a contratação de startups para impulsionar projetos de inovação internos como fornecedoras de serviços, produtos ou tecnologia (83,87%), seguidos por Investimentos (45,16%), Aquisições (25,81%), Aceleração de startups (16,13%) e, por último, Incubação de startups (6,45%). No mercado tem-se que o investimento é a principal prática de inovação adotada por corporações (DELOITTE, 2020).

Por se tratar de uma operação de baixa complexidade, quando comparada às outras iniciativas presentes nas possibilidades, consta que 50% das empresas que têm contratação de serviços como forma de engajamento, possuem essa única iniciativa. Entretanto, 100% das que realizam Aquisições ou Incubação de startups e 92,86% Investimentos possuem outras iniciativas conjuntas no *portfólio* (infográfico 10).



Infográfico 10. Tipos de relacionamento com startups praticados

Fonte: A autora, 2022.

Quais são os principais objetivos, desafios e benefícios do relacionamento com startups:

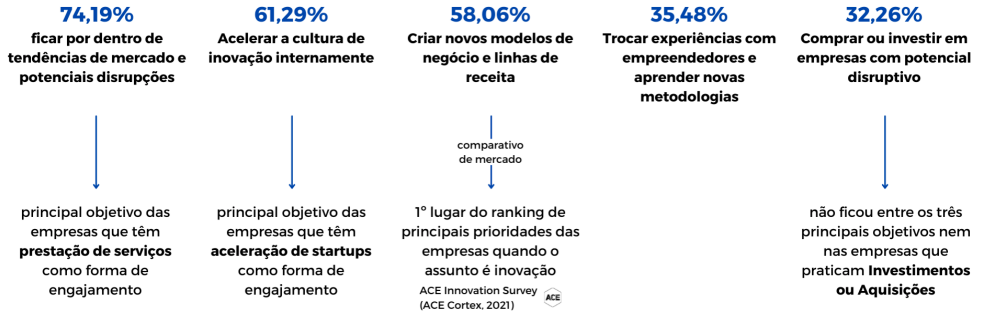
Objetivos

Uma das principais motivações das corporações interagirem com startups é alcançar objetivos estratégicos, há necessidades institucionais das empresas que reforçam esse relacionamento com startups: (i) eficiência e efetividade, (ii) aprendizado e conhecimento, (iii) desenvolvimento de novos mercados (MAZZOLA; PERRONE, 2013).

Os três principais objetivos das corporações presentes nesta pesquisa são ficar por dentro de tendências de mercado e potenciais disrupções (74,19%), acelerar a cultura de inovação internamente (61,29%) e criar novos modelos de negócio e linhas de receita (58,06%). Por fim, trocar experiências com empreendedores e aprender novas metodologias (35,48%) e comprar ou investir em empresas com potencial disruptivo (32,26%).

Empresas que têm contratação de serviços como forma de engajamento o principal objetivo é ficar por dentro de tendências de mercado e potenciais disrupções. Enquanto, a maioria das empresas que aceleram startups estão em busca de acelerar a cultura de inovação internamente. O objetivo de comprar ou investir em empresas com potencial disruptivo não ficou entre os três principais objetivos nem nas empresas que praticam investimentos ou aquisições (infográfico 11).

No comparativo com o mercado geral, temos que a principal prioridade das empresas quando o assunto é inovação é criar novos modelos de negócio e linhas de receita de acordo com a ACE Cortex (2021). Porém, o mesmo se apresenta como terceiro colocado na presente pesquisa.



Infográfico 11. Principais objetivos com o relacionamento com startups

Fonte: A autora, 2022.

Desafios

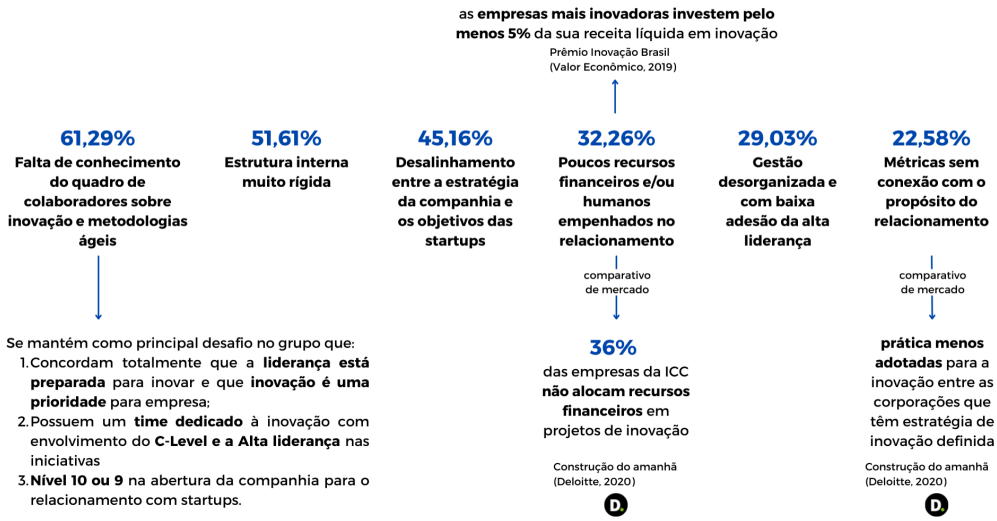
Apesar de difícil de ser alcançada, a combinação de dois mundos distintos, empresas e startups, pode ser uma combinação perfeita. As entrelinhas entre o trabalho corporativo e de startups colocam desafios reais à aproximação de ambos os lados. As diferenças culturais tendem a mal-entendidos, e diferentes velocidades organizacionais cobram seu preço ao longo do tempo (WEIBLEN; CHESBROUGH, 2015).

Os três principais desafios das empresas (Infográfico 12) respondente são falta de conhecimento do quadro de colaboradores sobre inovação e metodologias ágeis (61,29%), estrutura interna muito rígida (51,61%) e desalinhamento entre a estratégia da companhia e os objetivos das startups (45,16%). Seguidos por poucos recursos financeiros e/ou humanos empenhados no relacionamento (32,26%), gestão desorganizada e com baixa adesão da alta liderança (29,03%) e métricas sem conexão com o propósito do relacionamento (22,58%).

Importante frisar que a falta de conhecimento do quadro de colaboradores sobre inovação e metodologias ágeis se mantém como principal desafio também no grupo de respondentes que concordam totalmente que a liderança está preparada para inovar e que inovação é uma prioridade para empresa, possuírem um time dedicado à inovação com envolvimento do C-Level e a Alta liderança nas iniciativas e nível 10 ou 9 na abertura da companhia para o relacionamento com startups.

Por outro lado, o principal desafio das corporações do setor é a adoção de controles e métricas, uma vez que foi a prática menos adotada para a inovação entre as corporações que têm estratégia de inovação definida (DELOITTE, 2020).

Além disso, 36% das empresas da ICC não alocam recursos financeiros em projetos de inovação e 23% investem menos de 1% de seu orçamento (DELOITTE, 2020). Segundo o Prêmio Inovação Brasil do Valor Econômico (2021), as empresas mais inovadoras investem pelo menos 5% da sua receita líquida em inovação.



Infográfico 12. Principais desafios com o relacionamento com startups

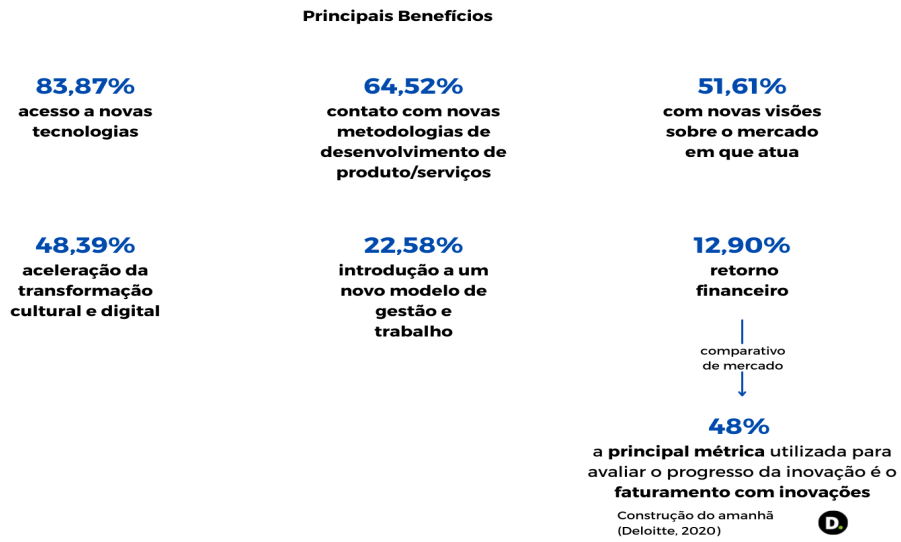
Fonte: A autora, 2022.

Benefícios

As corporações estão estabelecendo exemplos poderosos de como trabalhar e investir em startups que podem ajudar a defender e aumentar a posição no mercado (MOCKER; BIELLI; HALEY, 2015). As características das grandes corporações são utilizadas em conjunto com novos empreendedores para desenvolver as soluções e inovações de uma forma mais ágil (ANTHONY, 2012; FURLANI, 2018), buscando benefícios para ambas as partes. As corporações que promovem engajamento com startups, contam com benefícios mais amplos do que apenas o acesso à inovação e ao ecossistema de negócios. A interação com startups fornece ferramentas para explorar novos modos de trabalho e até alcançar a transformação digital (SBAMPATO, 2020).

Os três principais benefícios (Infográfico 13) das corporações analisadas na pesquisa são acesso a novas tecnologias (83,87%), contato com novas metodologias de desenvolvimento de produto/serviços (64,52%) e com novas visões sobre o mercado em que atua (51,61%). Por fim, a aceleração da transformação cultural e digital da empresa (48,39%), introdução a um novo modelo de gestão e trabalho (22,58%) e retorno financeiro (12,90%).

As corporações da Construção Civil ainda não têm de forma objetivas a noção de sucesso dos projetos de inovação. Contudo, 48% informam que a principal métrica utilizada para avaliar o progresso da inovação é o faturamento com inovações.



Infográfico 13. Principais benefícios com o relacionamento com startups

Fonte: A autora, 2022.

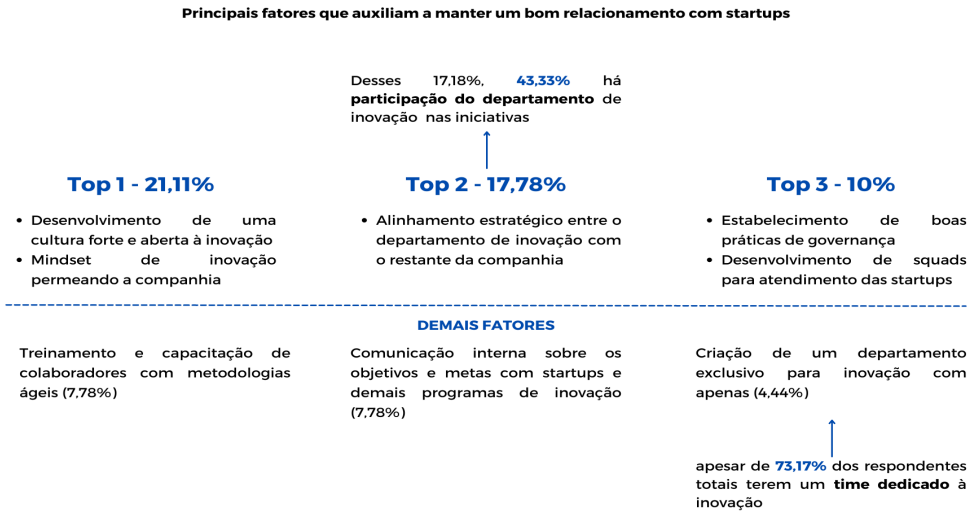
Quais são os principais fatores que auxiliam a manter um bom relacionamento com startups?

A gestão da inovação é essencial para bons resultados no relacionamento com startups, sendo reflexo da capacidade de transformar conhecimento em inovação de maneira contínua e sistemática, por meio da mobilização de recursos, sob condições de incerteza (TIDD, BESSANT E PAVITT, 2008). A capacidade de geração de valor das inovações, através da criatividade para mudanças no negócio, incentivo da convergência tecnológica e engajamento das lideranças, é a real vantagem competitiva para o setor (DELOITTE, 2020).

De forma mais dispersa do que os principais objetivos, desafios e benefícios do relacionamento com startups compreendidos na seção anterior, os fatores que mais auxiliam (Infográfico 14) as corporações a manterem um bom relacionamento com startups são o desenvolvimento de uma cultura forte e aberta à inovação (21,11%) e *mindset* de inovação permeando a companhia (21,11%), seguidos por alinhamento estratégico entre o departamento de inovação com o restante da companhia com 17,78% e na terceira posição empatados com 10,00% o estabelecimento de boas práticas de governança e desenvolvimento de *squads* para atendimento das startups.

Por fim, há os fatores de treinamento e capacitação de colaboradores com metodologias ágeis (7,78%), comunicação interna sobre os objetivos e metas com startups e demais programas de inovação (7,78%). De forma curiosa, apesar de 73,17% dos respondentes terem um time dedicado à inovação, apenas 4,44% apontou que um departamento exclusivo para inovação era um fator essencial para o sucesso.

Junto a isso, 43,33% dos que acreditam que é essencial o alinhamento estratégico entre o departamento de inovação com o restante da companhia, há participação do departamento de inovação da companhia nas iniciativas de inovação (infográfico 26).



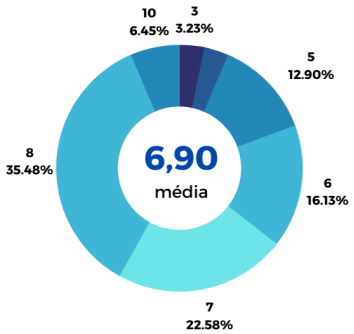
Infográfico 14. Principais fatores que auxiliam a manter um bom relacionamento com startups

Fonte: A autora, 2022.

Ao fim da análise das corporações da indústria da construção civil referente à inovação e relacionamento com startups, quando os 75,6% dos respondentes que possuem alguma iniciativa de engajamento com *startups* foram questionados sobre o preparo para lidar com *startups*, obteve-se nível média 6,90 de 10 e cerca de 35,48% das corporações se encontram abaixo da média.

Consideravelmente, 87,5% das corporações que informaram inicialmente serem nível 9 ou 10 na abertura para lidar com as *startups* deram menor nota em relação ao preparo para lidar com elas. Apenas 6,45% das corporações acreditam ser nível 9 ou 10 no preparo para o relacionamento com *startups*, enquanto 39,02% dizem ser nível 9 ou 10 na abertura para o engajamento com *startups* (infográfico 15).

O menor nível de preparo são das corporações que praticam prestação de serviços como forma de engajamento, 34,62% desses estão abaixo da média geral (6,90), aquisições com 25,00% e investimentos com 14,29% abaixo da média geral. As demais, aceleração e incubação de startups permaneceram 100% das corporações acima da média.



35,48%
das empresas **abaixo da média**

25%
das que realizam **aquisições** estão abaixo da média

14,29%
das que realizam **investimentos** estão abaixo da média

87,5% das empresas que são **nível 9 ou 10** na **abertura** para lidar com as startups deram **menor nota** quando questionados sobre o **preparo**.

39,02%
nível 9 ou 10 na **abertura** para o relacionamento com startups

6,45%
nível 9 ou 10 no **preparo** para o relacionamento com startups

Infográfico 15. Preparo da companhia para interação com startups

Fonte: A autora, 2022.

CONCLUSÃO

Dado as 41 respostas dos funcionários de diferentes níveis hierárquicos das empresas da Indústria da Construção Civil da região Sudeste (78,05%), Sul (12,20%), Nordeste (4,88%) e Centro-Oeste (2,44%); de diversos segmentos da ICC, como construção de edificações (51,22%), obras de infraestruturas (19,51%), serviços especializados (12,20%) e materiais de construção ou fornecedores (12,20%); e distintas receita operacional, tal qual grande porte (73,17%), médio porte (19,51%) e pequeno porte (7,32%).

Entendeu-se, no que diz respeito ao estágio de inovação das corporações do setor da construção civil no Brasil que 78,05% dos respondentes concordam parcialmente (56,10%) ou totalmente (21,95%) que as lideranças estão preparadas para inovar; de forma similar 78,05% concordam parcialmente (46,34%) ou totalmente (31,71%) que inovação é uma prioridade para empresa; e por último, 73,17% possui time dedicado a inovação.

Somado a isso, em relação ao relacionamento com startups, resuma-se que há média do nível de abertura de todas empresas analisadas ao engajamento com startups é de 7,15 de 10, enquanto a média do nível de preparo das 31 companhias que possuem alguma iniciativa com startups (75,61%) é de 6,90 de 10.

A forma mais comum de engajamento com as startups é contratação para impulsionar projetos de inovação internos como fornecedoras de serviços, produtos ou tecnologia (83,87%) e os departamentos de inovação da companhia são os principais responsáveis pelas interações (64,52%).

Quando analisados os principais objetivos, desafios e benefícios com o relacionamento corporativo com startups, têm-se os três principais fatores:

→ Objetivos: ficar por dentro de tendências de mercado e potenciais disrupções (74,19%), acelerar a cultura de inovação internamente (61,29%) e criar novos modelos de negócio e linhas de receita (58,06%);

→ Desafios: falta de conhecimento do quadro de colaboradores sobre inovação e metodologias ágeis (61,29%), estrutura interna muito rígida (51,61%) e desalinhamento entre a estratégia da companhia e os objetivos das startups (45,16%);

→ Benefícios: acesso a novas tecnologias (83,87%), contato com novas metodologias de desenvolvimento de produto/serviços (64,52%) e com novas visões sobre o mercado em que atua (51,61%)

Por fim, compreende-se os três principais fatores que auxiliam a manter um bom relacionamento com startups sendo o desenvolvimento de uma cultura forte e aberta à inovação (21,11%) e mindset de inovação permeando a companhia (21,11%), seguidos por alinhamento estratégico entre o departamento de inovação com o restante da companhia com 17,78% e na terceira posição empatados com 10,00% o estabelecimento de boas práticas de governança e desenvolvimento de squads para atendimento das startups.

Os resultados obtidos nesta pesquisa em relação a inovação e relacionamento com startups das corporações brasileiras da ICC analisadas, foram acima da média esperada dado as complexidades do setor e quando comparado ao mercado em geral. Por exemplo, 75,61% das corporações analisadas nesta pesquisa possuem algum tipo de engajamento com startups, entretanto em referências externas, 68% das empresas de diversos mercados e 67% das empresas da construção civil têm algum tipo de interação com startups (ACE CORTEX, 2021; DELOITTE, 2020).

Essa positividade se dá pelo viés do público analisado, o setor da ICC tem mais de 125.000 empresas, contudo a presente pesquisa analisou um recorte de 0,0328% dessas empresas, sendo em sua maioria corporações de grande e médio porte. O porte das corporações com base na receita, reflete inclusive nos investimentos em inovação, tendo que das 41 corporações analisadas, a maioria é reconhecida publicamente com diversas premiações de inovação, como a Andrade Gutierrez, Dexco, Grupo Tigre, Votorantim Cimentos e outras.

É recomendado para futuros trabalhos que foquem na divulgação junto às unidades de referência do setor, tal como os CREAs e outros, em busca de uma perspectiva de alcance expressivo das empresas do setor com objetivo de trazer diversidade aos dados coletados na pesquisa. Assim tendo, uma visão ampla do real estágio de inovação e relacionamento com startups da Indústria da Construção Civil.

Além disso, sugere-se o estudo aprofundado das iniciativas em particular da indústria com objetivo de compreender pormenores das formas de interação, tal como incubação, aceleração, contratação, investimentos e aquisições. Somado a isso, há a oportunidade de se realizar Teste A/B onde um mesmo processo é realizado da forma tradicional (Teste A) e com a implantação de alguma inovação (Teste B) para comparativo de impacto nos resultados financeiros e estratégicos, como a redução do prazo, maior lucratividade e percepção do valor pelo cliente.

A inovação e relacionamento com startups estão diretamente associados à diferenciação de produtos e serviços da construção civil, ampliando o desempenho financeiro e o sucesso da empresa, que são fatores essenciais para a sobrevivência do negócio dado o aumento da competitividade no setor.

REFERÊNCIAS

ACE CORTEX. **ACE Innovation Survey**, 2021. Disponível em <https://www.acecortex.com.br/wp-content/uploads/2021/10/ACE-INNOVATION-SURVEY-2021.2.pdf>. Acesso em: 10 de fev. 2022.

ACE CORTEX. **Report Hubs e Labs de Inovação**, 2022. Disponível em <https://www.acecortex.com.br/wp-content/uploads/2022/01/Report_hubs-e-labs-de-inovacao_ACECortex.pdf>. Acesso em: 20 de fev. 2022.

ADAMS, R.; BESSANT, J.; PHELPS, R. Innovation management and Measurement: A Review. **International Journal of Management Reviews**, v. 8, n.1, p. 21– 47, 2006.

AMORIM, Fernanda. **Estudo do Impacto das Empresas Juniores na formação do Engenheiro Metalúrgico ou de Materiais**. 2019. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes. 2019.

ANTHONY, Scott. D. The new corporate garage. **Harvard Business Review**, v.90, n.9, p. 44–53, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INCORPORADORAS IMOBILIÁRIAS. **PIB da Construção Civil cresce 9,7% em 2021**, 2021. Disponível em: <https://www.abrainc.org.br/construcao-civil/2022/03/04/pib-da-construcao-civil-cresce-97-em-2021/>. Acesso em: 24 de fev. de 2022.

BALL, M. Chasing a Snail: innovation and house-building firms. **Housing Studies**, v.14, n.1, p. 9-22, 1999 apud GRADVOHL; FREITAS; HEINECK, Desenvolvimento de um modelo para análise da acumulação de capacidades tecnológicas na indústria da construção civil: subsetor de edificações. **Ambiente construído**, v.11, n.1. 2011.

BARBETTA, P. A. **Estatística aplicada às ciências sociai**s. 6. ed. Florianópolis, Editora da UFSC, 2006.

BASU, Sandip; WADHWA, Anu. External Venturing and Discontinuous Strategic Renewal: An Options Perspective. **Journal of Product Innovation Management**, v.30, n.5, p.956-975, 2013.

BLANK, Steave; DORF, Bob. **Startup: Manual do empreendedor. O guia passo a passo para construir uma grande empresa.** 1ª ed. São Paulo: Altas Books, 2014.

BLOG TORO INVESTIMENTOS. **Ações imobiliárias e de construtoras: quais são as empresas listadas?, 2022**. Disponível em: <https://blog.toroinvestimentos.com.br/acoes-imobiliarias-construtoras>. Acesso em: 01 de mar. de 2022.

BNDES - Banco Nacional do Desenvolvimento. **Site do BNDES,** 2018. Porte da Empresa. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/porte-de-empresa>. Acesso em: 10 de jan. de 2022.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CONSTRUÇÃO. **Site do CBIC. Banco de dados - PIB Brasil e Construção Civil**. 2022. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/menu/pib-e-investimento/pib-brasil-e-construcao-civil>. Acesso em: 08 de mar. de 2022.

CBINSIGHTS. **State of Venture**, 2022. Disponível em: <https://www.cbinsights.com/research/report/venture-trends-2021/>. Acesso em: 12 de mar. de 2022.

CHESBROUGH, Henry. Business Model Innovation: Opportunities and Barriers. **Long Range Planning**, v.43, n.2-3, p. 354–363, 2010.

CHRISTENSEN, Clayton. **O Dilema da Inovação: Quando as novas tecnologias levam empresas ao fracasso.** São Paulo: M. Books Editora do Brasil Ltda, 2012.

DAHLANDER, Linus; GANN, David M. How open is innovation? **Research Policy**, v.39, n.6, p. 699–709, 2010.

DEMPWOLF, C. Scoot; AUER, Jennifer; D'IPPOLITO, Michelle. Innovation accelerators: Defining characteristics among startup assistance organizations. **Small Business Administration**, p.1-45 , 2014.

DIÁRIO DO COMÉRCIO. **Participação feminina no setor da construção cresce no País,** 2020. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/livre/participacao-feminina-no-setor-da-construcao-cresce-no-pais> Acesso em: 05 de fev. 2022.

DRUCKER, Peter. **Inovação e espírito empreendedor - prática e princípios**. São Paulo, Pioneira, 1986.

ELKINGTON, J. Enter the triple bottom line. In: HENRIQUES, Adrian; RICHARDSON, Julie. **The triple bottom line: Does it all add up.** London: Earthscan, 2004.p.1–16.

FURLANI, T. Z. **Engajamento de corporações com startups na quarta era da inovação: recomendações e sugestões.** 2018. 155p. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão do Conhecimento, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

GARCIA, Rosanna; CALANTONE, Roger A critical look at technological innovation typology and innovativeness terminology: a literature review. **The Journal of Product Innovation Management** , v.19, p. 110–132, 2002.

GERDAU, Prefeitura de SP, Ambev e Einstein unem forças para construir hospital público. **Gerdau S/A**, 2020. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/sobre-nos/noticias/gerdau-prefeitura-de-sp-ambev-e-einstein-unem-forcas-para-construir-hospital>. Acesso em: 04 de mar. de 2022.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ºed. São Paulo: Atlas S/A, 2002.

HAMEL, C.; PRAHALAD, C. D. **Competindo pelo futuro.** 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1995.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa anual da Indústria da Construção 2019 - PAIC. IBGE, 2021. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/54/paic_2019_v29_informativo.pdf>. Acesso em: 9 de mar. de 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística,** 2022. Comissão Nacional de Classificação. Disponível em: <https://cnae.ibge.gov.br/?view=secao&tipo=cnae&versaoclasse=7&secao=F>. Acesso em: 03 de mar. de 2022.

KAHN, K. B. Understanding innovation. **Business Horizons**, vol. 61, n. 3, p. 453-460, 2018.

KERLINGER, F. N. **Metodologia da pesquisa em ciências sociais.** São Paulo, EPU/EDUSP, 1980.

KITSUTA, Carla de Mattos. **Engajamento corporativo com startups : ambiente de negócios, capacidades em gestão da inovação e modos de engajamento.** Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. São Paulo, 2021.

KITSUTA, C. M. **Engajamento corporativo com startups : ambiente de negócios, capacidades em gestão da inovação e modos de engajamento**. Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. São Paulo, 2021 apud SCHOLL, L.; HIRTE, R, Incubation in Multinational Corporations: How to enhance the flow of resources between key stakeholders. **IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation**, p.1 - 8, 2018.

KURPJUWEIT, Stefan; WAGNER, Stephan. Startup Supplier Programs: A new model for managing corporate-startup partnerships. **California Management Review**, v.62, n.3, abril, 2020.

GOVERNO DO BRASIL. **Lei Complementar que estabelece Marco Legal das Startups**, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/financas-impostos-e-gestao-publica/2021/08/lei-complementar-que-estabelece-marco-legal-das-startups-entra-em-vigor-nesta-terca-feira-31#:~:text=As%20startups%2C%20de%20acordo%20com,como%20modelo%20de%20neg%C3%B3cio%20inovador>. Acesso em:26 de fev. 2022.

LORETO, Bruno. Revolução das Proptechs e Construtechs. Santa Catarina. **Terracotta Ventures**. 2019. 98p. Disponível em: <https://www.terracotta.ventures/insights>. Acesso em: 08 de mar. de 2022.

MATTOS, Fernando., GASTAL,Cláudio., RANK, Liliane., EMEDIATO, Gustavo., HEMÁN, Héctor., OSORIO, González. Brasília. **Movimento Brasil Competitivo**, 2008.

MAZZOLA, Erica., PERRONE, Giovanni. A strategic needs perspective on operations outsourcing and other inter-firm relationships. **International Journal of Production Economics**, Palermo, v.144, p.256-267, 2003.

MINSHALL, T., MORTARA, L., ELIA, S., & PROBERT, D. Development of Practitioner Guidelines for Partnerships between Start-ups and Large Firms. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v.19, n.3, 391-406, 2008.

MOCKER, Valerie; BIELLI, Simona; HALEY, Christopher. **Winning together winning: A guide to successful corporate–startup collaborations**. London: Nesta, 2015. 49p. Disponível em: <https://www.nesta.org.uk/report/winning-together-a-guide-to-successful-corporate-startup-collaborations> . Acesso em: 19 de mar. de 2022.

MOURA, R. et al. **Catálogo de Inovação na Construção Civil.** Brasília. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. 2019. Disponível em: <https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2017/11/Catalogo_de_Inovacao_na_Construcao_Civil_2016.pdf>. Acesso em: 10 de fev. de 2022.

NAM, C. M; TATUM, C. B. Major Characteristics of Constructed Products and Resulting Limitation of Construction Technology. **Construction Management and Economics**, v. 6, n. 2, p. 133-148, 1988 apud GRADVOHL; FREITAS; HEINECK, Desenvolvimento de um modelo para análise da acumulação de capacidades tecnológicas na indústria da construção civil: subsetor de edificações. **Ambiente construído**, v.11, n.1. 2011.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE). **Manual de Oslo: Diretrizes para a coleta e interpretação de dados sobre inovação**. 3 edição. Paris: OCDE, 2005.

PERRY, Mark. *Only 52 US companies have been on the Fortune 500 since 1955, thanks to the 'creative destruction' that fuels economic prosperity.* ***American Enterprise Institute,*** 2021. Disponível em: <https://www.aei.org/carpe-diem/only-52-us-companies-have-been-on-the-fortune-500-since-1955-thanks-to-the-creative-destruction-that-fuels-economic-prosperity-2>. Acesso em: 10 de mar. de 2022.

VGRESÍDUOS. **Resíduos da Construção Civil: construindo valores de sustentabilidade**, 2020. Disponível em <https://www.vgresiduos.com.br/blog/residuos-da-construcao-civil-construindo-valores-de-sustentabilidade>. Acesso em: 04 de fev. de 2022.

RIES, Eric. **A startup enxuta: como os empreendedores atuais utilizam a inovação contínua para criar empresas extremamente bem-sucedidas.** São Paulo: Lua de Papel, 2012.

RONDANI, Bruno *et al.* Panorama da Open Innovation entre Corporações e Startups no Brasil 2016-2021. **Open Startups**, 2021. Disponível em: <https://www.openstartups.net/site/ranking/insights-2021.html>. Acesso em: 15 de mar. de 2022.

SBAMPATO, Kaique. **Modos, Razões e Dificuldades no Engajamento Corporativo com Startups: uma Revisão Sistemática da Literatura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - COPPE,UFRJ. Rio de Janeiro, 2020.

SHARMA, Pramodita; CHRISMAN, James. Toward A Reconciliation of the Definitional Issues in the Field of Corporate Entrepreneurship. **Entrepreneurship: Theory and Practice**, v.23, n.3, 1999.

SOUSA, Raísa Fonseca de. **Inovações tecnológicas na construção civil**. 2015. 67p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

STRATEGY&. Brasil mais eficiente, país mais justo. **Strategy&**. 2014. 60p. Disponível em: <https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2017/11/Eficiencia_na_Construcao_Brasil_mais_Eficiente_Pais_mais_Justo_2015.pdf>. Acesso em: 28 de fev. de 2022.

STRATEGY&; VALOR ECONÔMICO. Prêmio Valor Inovação Brasil 2021. **Strategy&; Valor Econômico.** 2021. 26p. Disponível em: <https://www.strategyand.pwc.com/br/pt/inovacao-brasil/2021/valor-inovacao-2021-conteudo-site.pdf>. Acesso em: 28 de fev. de 2022.

TERRACOTTA VENTURES. Mapa das Construtechs e Proptechs 2021. 2021. **Terracotta Ventures**. Santa Catarina. 9p. Disponível em: <https://www.terracotta.ventures/>. Acesso em: 08 de mar. de 2022.

TIDD, Joe; BESSANT, John.; PAVITT, Keith. **Gestão da inovação**. 3ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

TYLER, B., & STEENSMA, H. (1995). Evaluating technological collaborative opportunities: A cognitive modeling perspective. **Strategic Management Journal**, v.16, 43-70.

QUINTÃO, Chiara. PIB da construção civil cresceu 8% em 2021, diz Sinduscon-SP. **Valor**, 2022. Disponivel em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2022/01/13/pib-da-construcao-civil-cresceu-8percent-em-2021-diz-sinduscon-sp.ghtml>. Acesso em: 04 de fev. de 2022.

WEIBLEN, T. e CHESBROUGH, H. Engaging with startups to enhance corporate innovation**. California Management Review**, v.57, n.2, p.66–90, 2015.

CAPÍTULO 3

A ROBÓTICA IMPULSIONADA POR AVANÇOS TECNOLÓGICOS NA EDUCAÇÃO E NA INDÚSTRIA, DESTAQUE PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

Data de aceite: 01/04/2024

Márcio Mendonça
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PP/CP. Cornélio Procópio - PR
http://lattes.cnpq.br/5415046018018708

Francisco de Assis Scannavino Junior
Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE) – Cornélio Procópio - Pr
http://lattes.cnpq.br/4513330681918118

João Maurício Hypólito
Departamento Computação-FATEC Ourinhos-SP
http://lattes.cnpq.br/5499911577564060

Iago Maran Machado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PP/CP. Cornélio Procópio - PR
http://lattes.cnpq.br/4733940365047328

Miguel Angel Chincaro Bernuy
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE). Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/0848702819711420

Emerson Ravazzi Pires da Silva
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE). Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/3845751794448092

Andressa Haiduk
Dimension Engenharia
Ponta Grossa - PR
http://lattes.cnpq.br/2786786167224165

Marcos Antônio de Matos Laia
Universidade Federal de São Joao Del Rei
Departamento De Ciência Da Computação – UFSJ. São Joao Del Rei - PR
http://lattes.cnpq.br/7114274011978868

Fabio Rodrigo Milanez
Faculdade da Industria Senai
Londrina – PR
http://lattes.cnpq.br/3808981195212391

Michelle Eliza Casagrande Rocha
Universidade Norte do Paraná – Unopar – Kroton. Londrina - PR
http://lattes.cnpq.br/7114274011978868

Janaína Fracaro de Souza Gonçalves
Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica (DAMEC). Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/1857241899832038

Marcio Jacometti
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento acadêmico das ciências humanas e sociais aplicadas (DACHS)
Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/8509336134084374

Fabio Nogueira de Queiroz
Centro Paula Souza
Departamento Computação-FATEC Ourinhos. Ourinhos – SP
http://lattes.cnpq.br/4466493001956276

Rodrigo Rodrigues Sumar
Universidade Tecnológica Federal do Paraná,
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE). Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/1461760661483683

Edinei Aparecido Furquim dos Santos
Governo do Paraná Secretaria de estado da Fazenda. Maringá – PR
http://lattes.cnpq.br/8706436030621473

Luan Ferreira Pereira
Faculdades Metropolitanas Unidas (FMU)
Graduando Engenharia da Computação
Jacarezinho - PR
http://lattes.cnpq.br/3522120783640199

André Luís Shiguemoto
Universidade Tecnológica Federal do Paraná,
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE). Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/9243656534211182

Henrique Cavalieri Agonilha
Graduando na Universidade Filadélfia (Unifil) . Londrina - PR
http://lattes.cnpq.br/9845468923141329

Henrique Franciz Ximenes de Andrade Bilbao
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão-PR
https://www.linkedin.com/in/henrique-ximenes-14512b113/

RESUMO: Este estudo destaca os avanços tecnológicos, especialmente na robótica colaborativa, em setores como a educação, indústria automobilística e a construção civil. Em particular, explora a aplicação de *Cobots* (robôs colaborativos) como o Kuka na indústria e o SAM na construção civil. A integração desses robôs tem demonstrado maximizar a produtividade e eficiência, combinando a precisão e velocidade da robótica com a habilidade e capacidade humanas. O artigo realiza uma análise simplificada sobre como essa tecnologia impacta a produção, os trabalhadores, a economia, a segurança e a praticidade. Além disso, conclui identificando possibilidades para futuras pesquisas nesta área em constante evolução.
PALAVRAS-CHAVE: Robótica autônoma na Indústria, Robótica na Educação, Construção Civil, Robótica Colaborativa.

TECHNOLOGICAL ADVANCES BOOST ROBOTICS APPLICABILITY IN EDUCATION INDUSTRY AND CIVIL ENGINEERING

ABSTRACT: This work highlights technological advancements, particularly in collaborative robotics, in sectors such as the automotive education industry and construction. Specifically, it addresses the application of *Cobots* (collaborative robots) such as Kuka in the industry and SAM in construction. The use of these robots maximizes productivity and efficiency by combining the precision and speed of robotics with human skill and capability. Collaborative robotics has applicability in a variety of sectors beyond those mentioned in. The article discusses and provides a simplified analysis of how this technology impacts production, workers, the economy, safety, and practicality. It concludes and addresses possibilities for future research in the field.
KEYWORDS: Autonomous Robotics in Industry, Robotics in Education, Civil Construction, Collaborative Robotics.

INTRODUÇÃO

O objetivo deste estudo é fornecer exemplos de aplicações de robôs colaborativos, também conhecidos como *Cobots*, em diversas esferas, incluindo a construção civil e a educação. Nota-se que os *Cobots* têm se destacado pela combinação da capacidade de improvisação e raciocínio humano com a precisão e repetibilidade dos robôs, resultando em avanços significativos.

Na área educacional, os robôs desempenham um papel fundamental como ferramentas para motivar e desenvolver o raciocínio lógico, especialmente em níveis mais básicos de ensino, como é o caso do software *Scratch*, por exemplo.

Destaca-se ainda que na indústria, a robótica, em especial a autônoma, figura como um dos pilares da Indústria 4.0, juntamente com técnicas de inteligência artificial e realidade aumentada, entre outras.

Assim, a motivação para esta pesquisa está intimamente ligada ao objetivo de explorar e compreender o crescente impacto dessas instâncias de robótica nos últimos anos.

DESENVOLVIMENTO

Esta seção discorre duas áreas de aplicação dos robôs colaborativos. Entretanto ressalta-se que outras áreas como a indústria farmacêutica utilizam esse importante e relativamente recente conceito da robótica.

Robôs utilizados na indústria

De um modo especial, a robótica colaborativa, uma das modalidades do emprego de robôs nas indústrias, conceito relativamente recente envolve a interação e cooperação entre humanos e robôs em ambientes compartilhados de trabalho. Para garantir a segurança e eficiência dessa colaboração, é importante seguir uma série de normas e diretrizes. Algumas das principais normas e diretrizes incluem:

1. Avaliação de risco: Antes de implantar um robô colaborativo, é fundamental realizar uma avaliação de risco completa, identificando possíveis perigos e definindo medidas de mitigação.

2. Conformidade com normas internacionais: Siga as normas internacionais de segurança em robótica colaborativa, a serem discorridas no texto.

3. Treinamento e qualificação: Certifique-se de que todos os trabalhadores envolvidos na operação de robôs colaborativos tenham recebido treinamento adequado e estejam qualificados para realizar suas tarefas.

4. Design ergonômico: O design do ambiente de trabalho deve ser ergonômico e seguro para os trabalhadores humanos e robôs, levando em consideração aspectos como espaço, iluminação e disposição de equipamentos.

5. Delimitação de áreas de trabalho: Estabeleça áreas de trabalho claramente delimitadas para humanos e robôs, usando barreiras físicas, sensores de segurança ou outras tecnologias, se necessário.

6. Monitoramento e supervisão: Implemente sistemas de monitoramento e supervisão para garantir a segurança e eficiência das operações, incluindo câmeras, sensores e sistemas de comunicação.

7. Parada de emergência: Todos os robôs colaborativos devem ser equipados com sistemas de parada de emergência que permitam aos trabalhadores humanos interromper as operações do robô em caso de perigo.

8. Manutenção e inspeção: Realize manutenção e inspeção periódicas dos robôs colaborativos e de seus sistemas associados para garantir que estejam funcionando corretamente e de forma segura.

9. Revisão e atualização: Revise regularmente as normas, diretrizes e procedimentos relacionados à robótica colaborativa e faça as atualizações necessárias para se adaptar às mudanças tecnológicas e às melhores práticas do setor.

10. Cultura de segurança: Incentive uma cultura de segurança entre os trabalhadores,

promovendo a conscientização sobre os riscos associados à robótica colaborativa e incentivando a comunicação aberta e o compartilhamento de preocupações.

Os robôs colaborativos, ou *Cobots*, cujos conceitos e fundamentos são empregados nos dois exemplos citados neste trabalho, são projetados para trabalhar em conjunto com humanos em ambientes compartilhados, buscando interações seguras e eficientes (MENDONÇA et al., 2022). Eles são desenvolvidos com foco na segurança, flexibilidade e facilidade de programação, utilizando técnicas inteligentes para aprimorar sua interação com os humanos. Os *Cobots* são equipados com sensores avançados, como sensores de proximidade, força e visão, que permitem detectar a presença de seres humanos no ambiente, evitando colisões e garantindo a segurança durante a colaboração usando sensores algoritmos entre outras técnicas para garantir a integridade humana. Neste contexto pode-se citar o trabalho de Hassan e Oddo (2022) afirmam que sensores táteis para o reconhecimento de materiais em robôs sociais e colaborativos são brevemente revisados.

Quanto às normas, destacam-se a ISO 10218, que estabelece requisitos de segurança para robôs industriais, abordando princípios gerais, requisitos de projeto, integração e diretrizes para avaliação de riscos, e a ISO/TS 15066, que fornece orientações para a interação física entre humanos e robôs, estabelecendo limites para as forças e pressões aplicadas pelos *Cobots* durante a interação com seres humanos, garantindo a segurança dos operadores (MENDONÇA, SILVA, ALMEIDA, 2022).

Outra norma relevante é a ANSI/RIA R15.06, específica para a segurança de robôs industriais, que também aborda requisitos e diretrizes relacionados à colaboração entre humanos e robôs. Essa norma engloba aspectos como design, integração, programação e operação segura dos robôs (ANSI/RIA, 2012).

Robôs utilizados na construção civil

O texto destaca a introdução de robôs na construção civil, apontando seu potencial para aumentar a eficiência, reduzir custos e melhorar a segurança dos trabalhadores, conforme mencionado por Oliveira e Nascimento (2020). Também ressalta a contribuição dos robôs na superação da escassez de mão de obra na indústria da construção, como destacado por Sousa et al. (2021). Um exemplo notável é o robô SAM, desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), que executa tarefas de alvenaria de forma eficiente e precisa. O SAM utiliza sistemas inteligentes, como visão computacional para detectar tijolos e entender o ambiente, planejamento de trajetória para determinar a melhor rota, controle de movimento para movimentos precisos e aprendizado de máquina para melhorar seu desempenho ao longo do tempo.A figura 2 mostra o robô.

O robô SAM, desenvolvido pelo MIT, é um exemplo notável de colaboração entre tecnologia e trabalhadores humanos na indústria da construção. Sua capacidade de entender e responder a comandos humanos o torna uma ferramenta valiosa para equipes de construção. Embora demonstre como a tecnologia pode melhorar a eficiência e a produtividade em ambientes de trabalho manuais, é importante considerar as limitações e desafios associados ao seu uso, como destacado por diversos estudos. Isso inclui a necessidade de habilidades técnicas avançadas para programação e manutenção, além da importância da gestão cuidadosa para garantir a segurança e a harmonia na interação entre robôs e trabalhadores humanos.

Já o Hadrian X é a primeira máquina robótica móvel de colocação de blocos do mundo, capaz de trabalhar com segurança ao ar livre em ambientes não controlados com velocidade e precisão

Figura 2. Robô SAM-MIT.

Fonte: Disponível em: https://www.mit.edu/.

Hadrian X é a primeira máquina robótica móvel de colocação de blocos do mundo, capaz de trabalhar com segurança ao ar livre em ambientes não controlados com velocidade e precisão. Este robô inovador da empresa australiana *Fastbrick Robotics* (FBR) está mudando a forma como as casas e outras estruturas são construídas.

Figura 3. Robô Hadrian X.

HADRIAN X: O ROBÔ AUTÔNOMO QUE REVOLUCIONA A CONSTRUÇÃO CIVIL

Características e Capacidades

Construção autônoma: O Hadrian X utiliza um modelo CAD 3D para construir estruturas de blocos de concreto com alta precisão, sem a necessidade de mão de obra humana para a colocação dos blocos.

Eficiência e rapidez: O robô pode colocar até 1.000 blocos ou até tijolos por hora, o que equivale a construir as paredes de uma casa em apenas um dia.

Segurança: O Hadrian X é equipado com sensores e sistemas de segurança que garantem sua operação segura em ambientes de trabalho.

Flexibilidade: O robô pode ser adaptado para trabalhar com diferentes tipos de blocos e materiais de construção.

Sustentabilidade: O Hadrian X gera menos resíduos do que os métodos de construção tradicionais, contribuindo para um futuro mais sustentável.

Aplicações e Impactos

Construção de casas: O Hadrian X tem o potencial de revolucionar a indústria da construção civil, reduzindo custos e prazos de entrega de casas.

Edificações comerciais: O robô pode ser utilizado para construir edifícios comerciais, como escritórios, escolas e hospitais.

Infraestrutura: O Hadrian X pode ser aplicado na construção de pontes, muros de contenção e outras obras de infraestrutura.

Áreas remotas: O robô pode ser usado para construir em áreas remotas e de difícil acesso, onde a mão de obra humana é escassa.

Hadrian X: O Robô Autônomo que Revoluciona a Construção Civil

Hadrian X é a primeira máquina robótica móvel de colocação de blocos do mundo, capaz de trabalhar com segurança ao ar livre em ambientes não controlados com velocidade e precisão. Este robô inovador da empresa australiana *Fastbrick Robotics* (FBR) está mudando a forma como as casas e outras estruturas são construídas.

Eficiência e rapidez: O robô pode colocar até 1.000 blocos ou até tijolos por hora, o que equivale a construir as paredes de uma casa em apenas um dia.

Segurança: O Hadrian X é equipado com sensores e sistemas de segurança que garantem sua operação segura em ambientes de trabalho.

Flexibilidade: O robô pode ser adaptado para trabalhar com diferentes tipos de blocos e materiais de construção.

Sustentabilidade: O Hadrian X gera menos resíduos do que os métodos de construção tradicionais, contribuindo para um futuro mais sustentável.

Aplicações e Impactos

Construção de casas: O Hadrian X tem o potencial de revolucionar a indústria da construção civil, reduzindo custos e prazos de entrega de casas.

Edificações comerciais: O robô pode ser utilizado para construir edifícios comerciais, como escritórios, escolas e hospitais.

Infraestrutura: O Hadrian X pode ser aplicado na construção de pontes, muros de contenção e outras obras de infraestrutura.

Áreas remotas: O robô pode ser usado para construir em áreas remotas e de difícil acesso, onde a mão de obra humana é escassa.

O futuro da construção

O Hadrian X representa um grande salto tecnológico na indústria da construção civil. Com sua capacidade de construir de forma autônoma, eficiente e segura, este robô tem o potencial de revolucionar o setor e contribuir para a construção de um futuro mais sustentável.

Robótica na educação

A robótica na educação é uma ferramenta poderosa para engajar os alunos e desenvolver habilidades como resolução de problemas, pensamento crítico, colaboração e criatividade. Os kits de robótica educacional, como LEGO Mindstorms e VEX Robotics, permitem que os alunos projetem e programem robôs para realizar diversas tarefas, promovendo o aprendizado prático de matemática, ciências e tecnologia. Além disso, a robótica pode ser integrada em disciplinas tradicionais, como matemática e ciências, e usada para ensinar programação por meio de plataformas amigáveis como Scratch, como mostra figura 4, e Blockly. (RESNICK et al, 2009).

Em resumo, a robótica na educação proporciona uma abordagem prática e envolvente para o ensino, desde o básico até de conceitos STEM (Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática), preparando os alunos para os desafios do século XXI e inspirando futuros engenheiros, cientistas e inovadores.

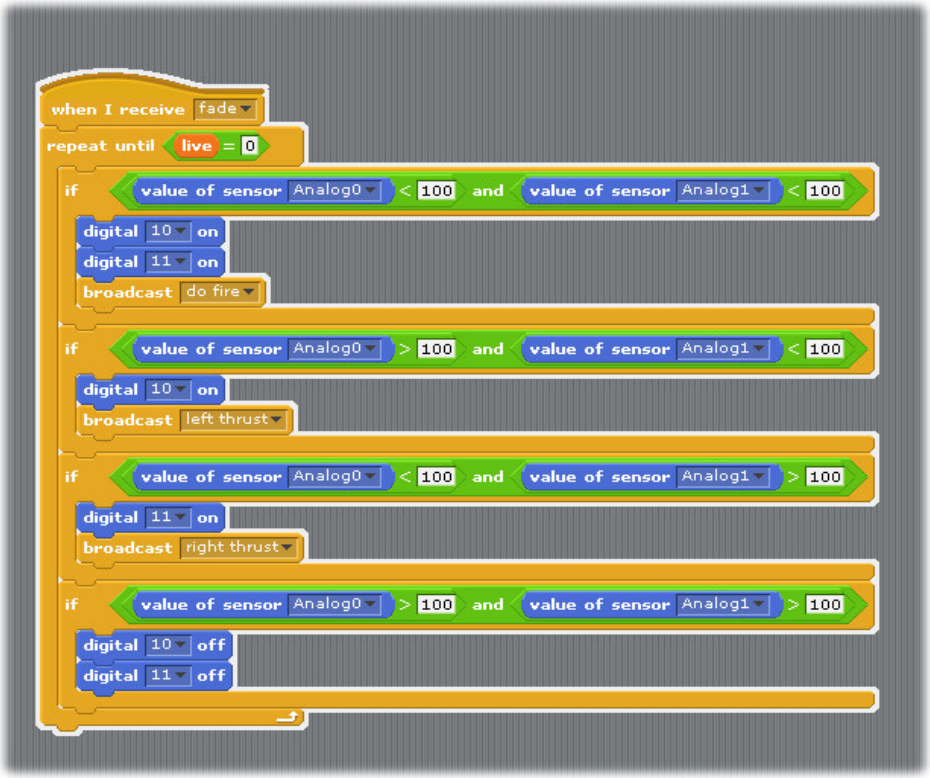


Figura 4. Exemplo de aplicação do Scratch.

RESULTADOS

A inclusão de robôs na educação, indústria e construção civil tem sido um avanço significativo na eficiência e produtividade desses setores. A automação e a inteligência artificial têm permitido melhorias consideráveis na precisão, velocidade e segurança das atividades realizadas (SILVA et al., 2020). Vamos analisar o impacto dessas tecnologias em cada setor.

Robôs colaborativos (*Cobots*) trabalham lado a lado com humanos em linhas de produção, aumentando a eficiência e reduzindo erros (SOUZA & RODRIGUES, 2020). A automação também permite uma maior flexibilidade na produção, possibilitando a fabricação de produtos personalizados em larga escala (MIRANDA & LIMA, 2018). Além disso, o uso de robôs na indústria tem contribuído para a redução de acidentes de trabalho e melhoria das condições laborais (BARBOSA & GONÇALVES, 2021).

A construção civil também tem se beneficiado da inclusão de robôs e tecnologias de automação (SANTANA & SILVEIRA, 2019). Robôs têm sido utilizados em tarefas como levantamento topográfico, escavação, transporte de materiais e até mesmo na impressão 3D de estruturas e edificações (AZEVEDO & CASTRO, 2020). Essas inovações resultam em projetos mais precisos, redução de custos e diminuição do tempo necessário para a conclusão das obras (CARVALHO & FONSECA, 2021). Além disso, o uso de robôs na construção civil pode reduzir os riscos associados ao trabalho em altura ou em condições perigosas, melhorando a segurança dos trabalhadores (VIEIRA & ALMEIDA, 2019).

No que concerne à quantificação do benefício do uso deste *Cobot*, a tarefa não é trivial, pois depende diretamente do desempenho humano. Segundo o MIT, um profissional habilidoso é capaz de assentar 400 tijolos, enquanto o SAM pode chegar a 2000. Isso sugere um aumento de produtividade de pelo menos cinco vezes, além de vantagens adicionais, como a precisão.

A inclusão de robôs na educação, indústria e construção civil tem proporcionado avanços significativos em eficiência e produtividade, graças à automação e inteligência artificial (SILVA et al., 2020). Os robôs colaborativos (*Cobots*) têm trabalhado lado a lado com humanos em linhas de produção, aumentando eficiência e reduzindo erros (SOUZA & RODRIGUES, 2020). Além disso, na indústria, a automação possibilita maior flexibilidade na produção, permitindo a fabricação de produtos personalizados em larga escala (MIRANDA & LIMA, 2018), e tem contribuído para a redução de acidentes de trabalho e melhoria das condições laborais (BARBOSA & GONÇALVES, 2021).

Na construção civil, robôs têm sido utilizados em diversas tarefas, como levantamento topográfico, escavação e transporte de materiais, resultando em projetos mais precisos, redução de custos e diminuição do tempo necessário para conclusão das obras (AZEVEDO & CASTRO, 2020; CARVALHO & FONSECA, 2021). Além disso, o uso de robôs pode melhorar a segurança dos trabalhadores ao reduzir os riscos associados ao trabalho em altura ou em condições perigosas (VIEIRA & ALMEIDA, 2019).

Em suma, a inclusão de robôs na indústria e construção civil tem trazido benefícios significativos em termos de precisão, velocidade, segurança e eficiência (SILVA et al., 2020).

A Tabela 1 mostra resultados das duas instanciações da robótica colaborativa abordadas nessa investigação científica.

Aplicação	Automobilística	Civil
Indústria	Até 97%	400%

Tabela 1. Valores obtidos durante os testes.

Com base na metodologia de Denavit-Hartenberg e seguindo as orientações de Niku (NIKU, 2013), foi possível desenvolver o modelo do robô Kuka, conforme ilustrado na Figura 5, ao variar dois graus de liberdade. Esta variação funciona como uma representação visual da trajetória do órgão terminal a qual está ressaltada na elipse.

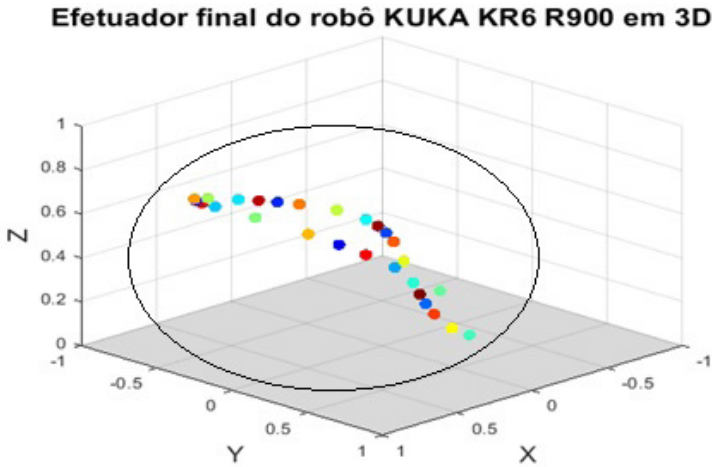


Figura 5 – Trajetória do Efetuador

Como exemplo deste processo de desenvolvimento, a nuvem de pontos do robô Kuka KR6 R900 foi plotada. Este robô é amplamente reconhecido e valorizado tanto na indústria quanto no meio acadêmico. A plotagem de sua nuvem de pontos demonstra a eficácia prática da simulação do raio de alcance do robô e a solução da cinemática inversa. Para fins de ilustração, neste caso, apenas dois ângulos foram modificados para exibir suas coordenadas em 3D.

Técnicas de aprendizado de máquina, tais como redes neurais artificiais, podem ser empregadas para lidar com um grande volume de dados para treinamento e pontos adicionais para teste e validação na solução da cinemática inversa. A exemplo disso, o estudo conduzido por Dalmedico et al. (2018) aplicou redes neurais artificiais para resolver a cinemática inversa de um manipulador 3D.

A integração da robótica na educação proporciona diversos e impactantes resultados:

Engajamento dos alunos: A abordagem prática e divertida da robótica mantém os alunos motivados e participativos.

Desenvolvimento de habilidades STEM: Os alunos aprimoram habilidades de resolução de problemas, pensamento crítico e criatividade ao projetar e programar robôs.

Colaboração e trabalho em equipe: Atividades em equipe promovem a comunicação e resolução de conflitos.

Preparação para o mercado de trabalho: Os alunos ganham experiência em tecnologia, programação e trabalho em equipe, preparando-os para carreiras modernas.

Inclusão e diversidade: A robótica oferece oportunidades para alunos com diferentes habilidades e estilos de aprendizado, promovendo a inclusão e diversidade.

Estímulo à criatividade e inovação: Os desafios da robótica incentivam os alunos a pensar de forma criativa e buscar soluções inovadoras.

Esses resultados destacam o impacto significativo da robótica na educação, preparando os alunos para um futuro tecnológico e globalizado.

CONCLUSÕES

Os estudos analisados neste artigo revelam resultados promissores sobre o emprego da robótica colaborativa em áreas específicas, como educação, indústria automobilística e construção civil. Tanto na educação quanto na indústria, houve melhorias significativas em produtividade e qualidade, impulsionadas pela precisão e eficiência dos robôs colaborativos. No entanto, essa discussão é apenas o início para futuras pesquisas que explorarão a interseção entre robótica e inteligência artificial em outros campos cruciais.

À medida que a pesquisa avança em direção a um futuro em que robótica e inteligência artificial se combinam para desenvolver aplicações, espera-se que tais avanços resultem em melhorias tangíveis na qualidade de vida das pessoas. Isso pode se manifestar em um aumento na produção e qualidade dos alimentos, na realização de cirurgias menos invasivas

REFERÊNCIAS

ANSI/RIA. (2012). R15.06-2012 - **Industrial Robots and Robot Systems** - Safety Requirements. Recuperado de <https://www.robotics.org

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 10218-1:2018: **Robôs e dispositivos robóticos** – Requisitos de segurança para robôs industriais. Parte 1: Robôs. 2018.

AZEVEDO, L. & CASTRO, J. Automação na construção civil: o impacto da impressão 3D em edificações. **Revista de Engenharia Civil.** v. 12, n. 2, p. 34-45, 2020.

BARBOSA, J. & GONÇALVES, R. Robôs na indústria: implicações na segurança e saúde do trabalho. **Revista Brasileira de Engenharia de Produção.** v. 7, n. 1, p. 23-34, 2021.

CARVALHO, J. & FONSECA, E. Automação na construção civil: impactos na produtividade e custos. **Revista de Tecnologia da Construção.** v. 10, n. 2, p. 56-70, 2021.

DENAVIT, J.; HARTENBERG, R. S. **A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices.** Journal of Applied Mechanics, v. 22, n. 2, p. 215-221, 1955.

DALMEDICO, J. F.; MENDONÇA, M.; SOUZA, L. B. de; BARROS, R. V. P. Duarte; CHRUN, I. R. **Redes neurais artificiais aplicadas na solução do problema de cinemática inversa de um manipulador 3D.** In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS (IJCNN), 2018, Rio de Janeiro. Anais eletrônicos... Rio de Janeiro: IEEE, 2018. p. 1-6.

HASSAN, S. A.; ODDO, C. M. **Tactile sensors for Material recognition in Social and Collaborative Robots: A brief review.** In: 2022 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA), Messina, Italy, 2022. p. 1-5.

MENDONÇA, M.; PALÁCIOS, R. H. C.; BREGANON, R.; BOTONI DE SOUZA, L.; RODRIGUES CINTRA MOURA, L. **Análise da cinemática inversa e planejamento de trajetória aplicados em um manipulador robótico industrial colaborativo clássico.** IEEE Latin América Transactions, v. 20, n. 3, p. 363-371, mar. 2022. DOI: 10.1109/TLA.2022.9667133.

MENDONÇA, A.; SILVA, B.; ALMEIDA, C. **Os *Cobots* na indústria: Segurança e eficiência na colaboração homem-máquina.** Revista de Automação Industrial, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 45-58, 2022.

MIRANDA, T. & LIMA, F. A automação na indústria: explorando a flexibilidade e personalização em larga escala. **Revista de Engenharia e Tecnologia Industrial.** v. 14, n. 2, p. 88-102, 2018.

NIKU, S. B. **An Introduction to Robotics Analysis, Systems, Applications.** Upper Saddle River, N.J.: John Wiley & Sons, 2013.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL PARA PADRONIZAÇÃO. ISO/TS 15066:2016: **Robots and robotic devices - Collaborative robots.** 1. ed. 2016.

RESNICK, M., MALONEY, J., MONROY-HERNÁNDEZ, A., RUSK, N., EASTMOND, E., BRENNAN, K., MILLNER, A., ROSENBAUM, E., SILVER, J., SILVERMAN, B., & KAFAI, Y. B. (2009). **Programming by Choice:** Urban Youth Learning Programming with Scratch. Communications of the ACM, 52(11), 60-67.

SANTANA, J. & SILVEIRA, M. Inovações tecnológicas na construção civil: o papel dos robôs de alvenaria. **Revista Brasileira de Engenharia e Tecnologia**, vol. 8, n. 1, pp. 15-25, 2019.

SOUSA, J. M. et al. Robôs e equipamentos autônomos na construção civil: uma revisão de literatura. **Revista de Engenharia e Tecnologia.** v. 13, n. 1, p. 1-12, 2021.

SOUZA, M. & RODRIGUES, J. A aplicação de robôs colaborativos na indústria: eficiência e redução de erros. **Revista Brasileira de Inovação Tecnológica.** v. 11, n. 3, p. 45-59, 2020.

VIEIRA, P. & ALMEIDA, T. Drones na construção civil: aplicações e benefícios. **Revista Tecnologia e Construção**, v. 11, n. 3, p. 50-60, 2019.

CAPÍTULO 4

REUTILIZAÇÃO DE CONTAINER MARÍTIMO NA CONSTRUÇÃO DE ESPAÇOS EDUCACIONAIS: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL E INOVADORA

Data de aceite: 01/04/2024

Ivonete Borne
Universidade Federal da Paraíba – UFPB
Centro de Energias Alternativas e Renováveis - CEAR
João Pessoa – PB

Fabiano Salvadori
Universidade Federal da Paraíba – UFPB
Centro de Energias Alternativas e Renováveis - CEAR
João Pessoa – PB

Oswaldo Hideo Ando Junior
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE
Grupo de Pesquisa em Energia & Sustentabilidade Energética - GPEnSE
Cabo de Santo Agostinho – PE

RESUMO: Este artigo promove uma revisão abrangente sobre a viabilidade da reutilização de containers na construção civil, com ênfase na criação de espaços educacionais no contexto brasileiro. A pesquisa visa explorar o potencial construtivo dos containers, considerando sua interação com a sustentabilidade no setor da construção, visando suprir a crescente demanda por ambientes educacionais. A metodologia adotada envolveu extensa pesquisa bibliográfica e análise de projetos correlatos, destacando a aplicabilidade do método. Com base nas informações consolidadas, constatou-se que a reutilização de containers marítimos se configura como uma alternativa viável, proporcionando benefícios sociais, ambientais e econômicos significativos para o setor educacional.

PALAVRAS-CHAVE: Container, Sustentabilidade, Arquitetura Escolar, Construção Civil, Reutilização.

REUSE OF MARITIME CONTAINER IN THE CONSTRUCTION OF EDUCATIONAL SPACES: A SUSTAINABLE AND INNOVATIVE APPROACH

ABSTRACT: This article promotes a comprehensive review on the feasibility of reusing containers in construction, with an emphasis on the creation of educational spaces in the Brazilian context. The research aims to explore the constructive potential of containers, considering their interaction with sustainability in the construction sector, aiming to meet the growing demand for educational environments. The methodology adopted involved extensive bibliographical research and analysis of related projects,

highlighting the applicability of the method. Based on consolidated information, it was found that the reuse of maritime containers is a viable alternative, providing significant social, environmental, and economic benefits for the educational sector.
KEYWORDS: School Library, Container, Sustainability, School Architecture.

INTRODUÇÃO

O conhecimento é uma construção interior individual, em que os processos de construção são ativados no íntimo de cada indivíduo. Deste modo, os ambientes de ensino-aprendizagem exercem um papel crucial contribuindo para a formação e permitindo um processo de aprendizagem contínua. Logo, os ambientes destinados a ensino e aprendizagem transformam-se ao longo dos anos, dessa forma a arquitetura está cada vez mais presente nesses espaços com a preocupação em adequar a arquitetura escolar a novos formatos e exigências das metodologias de ensino, de acessibilidade e ergonomia (Kowaltowski, 2011).

Atualmente o tema construção, é essencial relacioná-lo com práticas que minimizam os impactos causados ao meio ambiente, visto que este setor é um dos que mais gera resíduos; então, antes de se projetar, é preciso refletir quanto à forma construtiva e materiais empregados, de modo a adotar iniciativas que promovam a sustentabilidade.

Destaca-se que os impactos causados pela construção civil ocorrem de forma visível e invisível, como por exemplo com o transporte aos quais consomem combustíveis fósseis, e ocasionam geração de outros resíduos. Além disso, a construção civil no mundo tem um consumo de: “matérias primas (30%), água (25%) e solo (12%). Além disso contribuem para emissão de poluentes como: atmosféricos (40%), efluentes de água (20%), resíduos sólidos e outras liberações (13%)” (Tavares, 2006 ***apud*** Levin, 1997).

Portanto, este estudo apresenta uma revisão que aborda as barreiras físicas, econômicas e geográficas da utilização de soluções arquitetônicas sustentáveis e tecnológicas aliando a inovação à promoção da sustentabilidade no ambiente acadêmico no país. A importância desse estudo é evidenciada pela demanda de espaços de educação, juntamente com a escassez de recurso, a viabilidade da reutilizando o container como método construtivo e o ganho de tempo de construção. Sendo assim, pode ser um passo essencial para preencher o déficit de infraestrutura com redução dos custos e de tempo de execução.

Diante desta problemática, o capítulo tem como objetivo apresentar e discutir sobre o potencial da reutilização de container marítimo como método construtivo sustentável em Ambientes Educacionais na realidade Brasileira. Por fim, apresenta-se alguns cases de sucesso da aplicabilidade do container marítimo como método construtivo em espaços de ensino e aprendizagem.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o principais conceitos e definições sobre a construção civil no ambiente educacional. No decorrer do capítulo aponta-se aspectos a partir do ponto de vista teórico, trazendo dados que evidencie a aplicabilidade do método em análise, a qual foi dividida em alguns temas principais: Construção sustentável e informações que fornecem suporte ao seu desenvolvimento; e a reutilização do container marítimo como alternativa de método construtivo.

Construção Sustentável

O método mais utilizado no Brasil para a construção civil é de alvenaria, muito em função de sua popularidade, do desconhecimento e do receio em se construir com outras técnicas. Além de sua baixa produtividade este método se utiliza de inúmeros recursos naturais para sua execução, com isso ocasiona um grande impacto ambiental, devido ao elevado desperdício de resíduo gerado durante todo o processo construtivo (Vasques; Pizzo, 2014, p. 2). Tavares (2006) afirma que, é consumido pelo setor da construção entre 14% e 50% de toda matéria-prima extraída na natureza, 16% de recursos hídricos e cerca de 40% de fonte de energia.

A escolha pela forma de construir e quais materiais serão utilizados, é primordial para amenizar os impactos causados pela cadeia construtiva, uma vez que necessitamos atender as demandas emergentes humanas (Araújo, 2022, p.23), em contrapartida procurar minimizar os danos causados por ela, através de uma construção mais sustentável. Santos afirma que a construção sustentável é aquela que adota um conjunto de medidas afim de minimizar os impactos negativos causados ao meio ambiente. Para uma edificação ser sustentável não basta apenas reutilizar materiais, deve-se levar em consideração todas as fases de implantação, assim, a compatibilização de todos os projetos desde o início é essencial para evitar perdas e consumos elevados de produtos e serviços (Santos, 2017, p. 13).

Com a intenção de minimizar os impactos causados pela indústria civil, a Agenda 21 Brasileira, elenca alguns pontos que devem ser necessários no combate ao desperdício, os quais envolvem desde a criação de legislação de forma mais objetiva, priorizando o reaproveitamento e redução dos resíduos gerados ao longo do processo, como também possuir destinos corretos para os mesmos, e priorizar também a segurança do funcionário da construção civil, através de tecnologias efetivas primando para a diminuição do desperdício gerado.

O panorama da construção civil mundial, em sua grande maioria não atendem aos critérios sustentáveis, Tavares (2006) considera que para uma construção ser considerada sustentável, é fundamental que alguns princípios sejam aplicados como: “na extração e no beneficiamento de matérias primas, no planejamento, no projeto, na técnica construtiva dos edifícios e na sua infraestrutura, até na sua desconstrução e no gerenciamento dos resíduos resultantes”.

Portanto, ao se analisar o ciclo de vida de uma edificação, que engloba desde a fabricação da matéria-prima necessária, como também a logística no transporte destes insumos até a finalização da obra, se torna um processo extenso e com grande geração de resíduos (Mussnich, 2015, p.02). No entanto, existem opções que podem corroborar para minimizar os efeitos ocasionados pelo processo construtivo, como por exemplo a reutilização de containers marítimos, pois além de contribuir no descarte e reuso deste material, contribui para reduzir os impactos causados pelos resíduos da construção civil.

Ademais, existem inúmeras técnicas de projetar de forma mais sustentável, como por exemplo utilizando como ferramenta a proposta realizada pelo Grupo de Trabalho de Materiais do Conselho Brasileiro da Construção Sustentável (CBCS), idealizaram a criação de um método que tem como objetivo estipular os dez (10) princípios norteadores do desempenho ambiental praticados na construção civil.

O intuito dos princípios citados na figura acima é a mensuração dos indicadores referentes as etapas de construção, que são: Consumo de Energia, Consumo de Água, Consumo de Recursos, Geração de Resíduos e Emissão de CO para verificar os níveis gerados pela cadeia construtiva, a fim de combater as mudanças climáticas.

Figura 1 - Princípios para avaliação de desempenho na construção.

Fonte: Degani, 2020. Adaptado pela autora, 2023.

Para que uma construção possa ser considerada como sustentável existe uma ferramenta que atribui a certificação *Leadership in Energy in and Environmental Design*, o LEED além da Certificação Internacional relacionada a questões ambientais da edificação, possui orientações para a construção visando a sustentabilidade, através de 4 tipologias para análise as quais envolvem desde a construções e reformas como a parte urbanística de bairros (Figura 2).

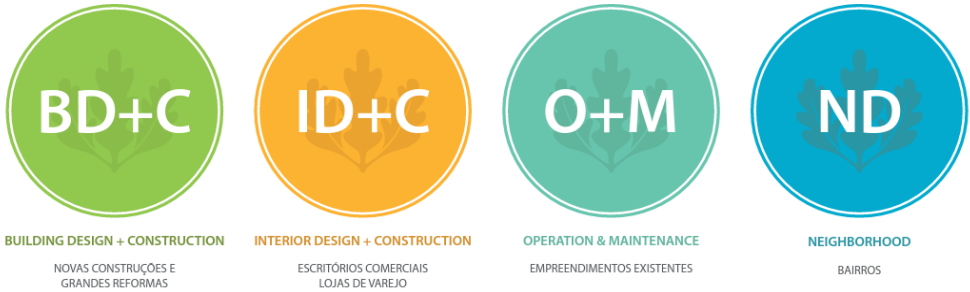


Figura 2 - Tipologias LEED

Fonte: GBC Brasil, 2023.

De acordo com Green Building Council Brasil (2023), este método pode contribuir para que sejam adotadas medidas de práticas sustentáveis para a construção, pois a análise se dá de forma completa desde as etapas iniciais até após a entrega da obra, visto que "leva em consideração questões de implantação, uso racional da água, eficiência energética, seleção dos materiais, qualidade ambiental interna, estratégias inovadoras e questões de prioridade regional" (Green Building Council Brasil, 2023).

Para que isso ocorra é necessário seguir algumas etapas para o credenciamento e a certificação LEED, são elas:

Figura 3 - Etapas de Certificação

Fonte: GBC Brasil, 2023.

Todas as ferramentas citadas na figura 3, colaboram para a redução dos impactos causados pela cadeia construtiva, com o objetivo de um trabalho conjunto de todos os autores, com a finalidade de encontrar outras possibilidades de construção ou minimizar os efeitos gerados pelas usadas atualmente, primando por um melhor desenvolvimento sustentável do setor.

Posto isto, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável-ODS, estabeleceram metas para que sejam criadas alternativas no âmbito social, institucional, ambiental e econômica (ODS, 2023), através de projetos, sendo esses dispostos em 17 indicadores como expõe a figura 4, com o propósito de serem implementadas tais ferramentas seja em uma construção, empresa ou até mesmo na comunidade.

Figura 4 - Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Fonte: ODS, 2023.

Container Marítimo na Construção Civil

O container foi originalmente idealizado para transporte de carga, o qual pode ser visto em grande escala no mundo inteiro, porém seu tempo de vida útil com esta função é de cerca de 10 anos, e consequentemente será descartado como sucata, entretanto seu potencial construtivo possibilita um leque de opções e surge como alternativa viável para construção civil, criando projetos sustentáveis e com custo mais acessível (Bueno, 2019).

A reutilização de container oferece inúmeras vantagens, Sousa e Campos (2021) descrevem esses benefícios em: Financeiro, Sustentável, Operacional e Habitacional. Na parte financeira ela tem uma redução de até 30 % ao se comparar com uma construção em alvenaria, no que se refere a sustentabilidade o próprio reaproveitamento do container se torna um incentivador para o seu uso, no Operacional, ele se torna uma opção rápida e eficiente, e no habitacional a possibilidade de criar um projeto com conforto tal qual uma construção convencional, suprindo as demandas por moradia, utilizando de tecnologia para o melhoramento térmico e acústico, proporcionado um ambiente agradável e aconchegante aos usuários (Sousa; Santos, 2021). Segundo Ferreira e Cavalcante (2019) *apud* Guedes e Buoro (2015) acrescentam que o container dá a possibilidade de uma arquitetura flexível, permitindo, assim, a ampliação ou desmontagem do edifício de forma racional. Promovendo a preservação de recursos naturais, a reutilização de materiais que seriam descartados, a redução de etapas construtivas e dos resíduos gerados durante a obra, esse método construtivo é uma técnica alternativa de construção que atende as ações necessárias ao desenvolvimento sustentável.

Logo, a pouca utilização pode estar relacionada com a falta de conhecimento, principalmente com o desinteresse de empresas no ramo da construção, visto que o acesso aos mesmos no Brasil é relativamente plausível, como pode ser visto na Figura 5, no país existem cerca de 40 portos, e destes 18 são portos marítimos, sua concentração está na região Sul e Nordeste.

Dentre as várias opções de container, na arquitetura os mais utilizados são os modelos Standard Container 20`, Standard Container 40`e o High Cube Container 40` (Tabela 1). No geral possuem características de uso modular e sua estrutura em formato autoportante (Mussnich, 2015, p. 06). Na visão de Santo e Bastos (2022, p.29) o container "[...] pode se converter em uma casa, escola, posto de saúde, refeitório ou qualquer outro espaço físico necessário, principalmente em casos de emergência, ou seja, a utilização da tala arquitetura modular é bem ampla".

Figura 5 - Mapa de Portos no Brasil

Fonte: Brasil, 2020.

Modelo	Medidas Externas	Imagem
Standard 20`	Comprimento 6.058 mm Largura 2.438 mm Altura 2.591 mm	
Standard 40`	Comprimento 12.192 mm Largura 2.438 mm Altura 2.591 mm	
High Cube Container 40`	Comprimento 12.192 mm Largura 2.438 mm Altura 2.895 mm	

Tabela 1 - Medida de Container Marítimo

Fonte: IDL Express, 2023. Adaptado pela autora, 2023.

As vantagens em optar por construir com container são inúmeras (Figura 6), mas existem desvantagens como por exemplo o transporte, este é um ponto limitante em muitos casos devido a distância entre o local de oferta e o de instalação, necessita também de guindaste para o manuseio, logo é preciso possuir uma área de transferência com tamanho adequado (Camilotti, 2023, p. 12).

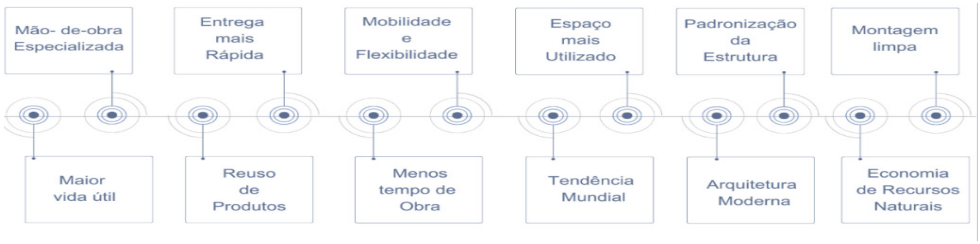


Figura 6 - Vantagens do Container

Fonte: Incontainer, 2017. Adaptado pela autora, 2023.

Para que a edificação tenha maior longevidade, é indicado que se reaproveite das estruturas já existentes, o uso de madeira de reflorestamento, utilizar materiais com baixo consumo energético, reaproveitar ao máximo as águas pluviais, fazer uso de placas solares para economia de energia, atenção a posição da edificação quanto a ventilação e incidência solar (Torres *et al.,* 2020, p. 06). Na reutilização do container marítimo para construção é imprescindível que algumas medidas sejam tomadas para garantir o bom desempenho, como o isolamento térmico e acústico, e atentar para a devida limpeza de descontaminação do container (Sousa; Campos, 2022. p. 220).

Ao projetar qualquer tipo de edificação se faz necessário atentar para as questões bioclimáticas, uma vez que a arquitetura pode utilizar de ferramentas para que a edificação fique adequada ao local, contribuindo para a qualidade e conforto do ambiente construído, de acordo com o mapa de Zonas Bioclimáticas (Figura 7).

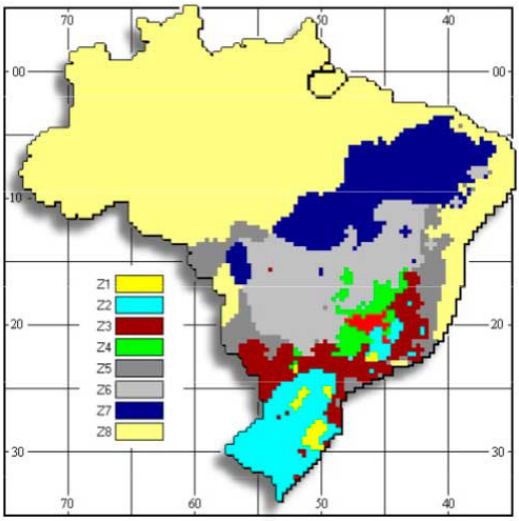


Figura 7 - Zonas Bioclimáticas no Brasil

Fonte: Bioclimatismo, 2023.

As etapas para sua construção podem variar a depender de seu porte, mas é importante seguir a sequência destacada na Figura 8.

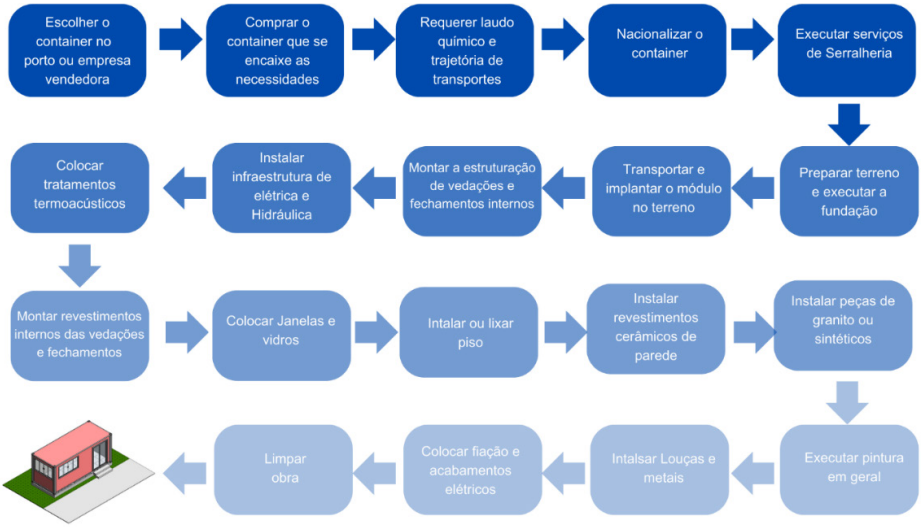


Figura 8 - Protocolo de execução

Fonte: Camilotti, 2023. Adaptado pela autora, 2023.

Portanto, utilizar um container marítimo para a construção civil, seja ela de uso residencial, comercial, espaços públicos entre outros, é uma estratégia social e ambiental, visto que contribuem na redução de novos materiais e na melhoria da sustentabilidade das edificações (Gonçalves; Ribeiro, 2022). Além disso, enfatizam que tanto para a sustentabilidade como também para a criatividade dos projetistas, que, com a evolução da construção aliada à ação sustentável, vem expandindo cada vez mais seus horizontes em relação aos métodos construtivos tradicionais e aos materiais utilizados atualmente, para obter, assim, resultados que satisfaçam esses âmbitos da construção do projeto (Alves; Ferreira; Cavalcante, 2019, p.22).

Atualmente não existem normas específicas para se construir com container, entretanto necessita seguir as orientações e normas para construção convencional, Drywall e Steel Frame, as quais são regulamentadas pelo Código Internacional de Construção (IBC), bem como as normas listadas na Tabela 2, e o Código de Obras da cidade onde será instalado.

No Brasil foi as construções utilizando container são fiscalizadas pelo INMETRO e pela ABNT. O container está enquadrado como um elemento inovador no segmento da construção civil, definido pelo Sistema Nacional de Avaliações Técnicas de Produtos Inovadores e Sistemas Convencionais (SINAT) como material, componente, sistema ou subsistema que não seja objeto de alguma Norma Brasileira realizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (Justino et al., 2021, p. 04).

Norma	Especificação
ABNT NBR 15575	Desempenho de Edificações Habitacionais
ABNT NBR 9050	Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos
NBR 6492	Representação de projetos de Arquitetura
NBR 13532	Elaboração de projetos de edificações, arquitetura
NBR 5261	Símbolos gráficos de eletricidades, princípios gerais para o desenho de símbolos gráficos
NBR 14100	Proteção contra incêndio, símbolos gráficos para projetos

Tabela 2 - Normas e diretrizes para o projeto

Fonte: ABNT-NBR 15575, 2013. ABNT-NBR 9050, 2015. Adaptado pela autora, 2023.

Alguns laudos são necessários para certificarem a segurança do container como o estrutural em uma construção, como também da descontaminação de containers, de acordo com a ANVISA, para se reutilizar o container como residência ou comércio, é preciso seguir itens da NR 18, a qual aborda as condições de Segurança e Saúde no Trabalho na Indústria da construção, devendo se atentar também a Vigilância Sanitária para realizar os laudos de Inspeção Química necessários para sua liberação (Bueno, 2019, p. 26).

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção de delineamento metodológico será detalhado passo a passo, incluindo a descrição de suas etapas, a justificativa das decisões tomadas e as ferramentas utilizadas. A metodologia adotada nesta pesquisa baseia-se na fundamentação teórico- empírica, a qual trata-se de uma pesquisa exploratória e descritiva, e nas palavras de Piovesan e Temporini (1995, p. 321) "[...] como o estudo preliminar realizado com a finalidade de melhor adequar o instrumento de medida à realidade que se pretende conhecer.

A metodologia é composta por três etapas: (I) análise dos métodos construtivos convencionais; (II) estudo da aplicabilidade do container na construção civil; (III) demonstrativo potencial do container para fins educacionais.

Inicia-se pela coleta de informações por meio de pesquisa bibliográfica e levantamento de dados referentes a utilização de containers marítimos para projetos voltados a construção civil. Posteriormente, foi realizado um levantamento quanto as características construtivas, bem como vantagens e desvantagens na utilização do container na construção civil.

Por fim, apresenta-se foi desenvolvido um estudo a partir de referências projetuais por meio de análise de correlatos visando aprofundar e auxiliar na compreensão sobre o tema e sua aplicabilidade apresentando projetos que utilizam o container como método construtivo em ambientes de ensino e pesquisa, com o objetivo de oferecer embasamento técnico e teórico.

DETALHAMENTO DO MÉTODO CONSTRUTIVO

Ao longo desta seção do capítulo, apresenta-se as principais etapas para a realização do projeto e construção utilizando container marítimo que são: a elaboração do projeto arquitetônico, os tipos de fundações para cada projeto, o reforço estrutural (em caso de alterações no container), sistemas elétrico e hidráulico, tipos de revestimentos, opções de cobertura e, por fim o acabamento e pintura.

Projeto

O projeto arquitetônico é a primeira fase e na qual será definido a tipologia de container que será utilizado, as limitações e características do terreno, como topografia entre outros, como ele será implementado no lote, levando em consideração a incidência solar, para tirar proveito da iluminação natural e prevenindo a exposição errada ao sol, estudo da ventilação com a finalidade de projetar as aberturas de forma que promova uma ventilação cruzada e a definição do Layout interno.

De acordo com Gonçalves e Ribeiro (2022, p.02) se torna viável a construção em container pois "[...] ele possibilita um tipo de arquitetura flexível, componível, e que permite a ampliação ou desmontagem da edificação de modo prático e racional", logo se torna uma opção atraente também para lugares locados, onde pode retirar o container e levá-lo para outro local.

Fundação

A construção com container requer uma fundação de mesma forma que outros sistemas construtivos, mas antes disso deve se ter um estudo do terreno, através de terraplanagem, limpeza e regularização do solo, após a escolha pelo tipo de fundação dependerá do tamanho do container. Dentre as várias opções de fundações, as mais utilizadas para este sistema são: Vigas Baldrame, Lajes radier (Figura 9), sapatas isoladas (Figura 11) de concreto e corridas, na execução de mais containers no projeto é necessário utilizar a fundação Radier (Alves; Ferreira; Cavalcante, 2019).

(a) **(b)**

Figura 9 – (a) Fundação Radier e (b) sapata isolada.

Fonte: Luiz, 2018 & Portal Metálica, 2021

De acordo com França Junior (2017), as fundações tipo radier é a opção com melhor custo, visto que consomem menos materiais e o mão de obra, entretanto vale ressaltar que as instalações hidráulicas elétricas embutidas no radier, somente será possível a manutenção retirando parcial ou totalmente o container, e a demolição do local onde será reparado, já as fundações com sapatas isoladas ou corridas, tem uma vantagem nas manutenções ou alterações de maior impacto.

Estruturas

Os containers possuem estruturas a partir da união de topo, laterais e base, conforme ilustra Figura 10, cada uma é responsável pela totalidade da sua resistência, com isso ao retirar ou alterar quaisquer desses itens, é imprescindível que se faça os cálculos necessários, pois geralmente é necessário reforços estruturais devido as alterações. Projetos em container podem ser construídos em diversos formatos, sejam empilhados, lado a lado, entre outros, mas para isso, a depender se sua junção se utiliza parafusos, peças de canto ou até mesmo uso de solda. Na fundação com o concreto ainda fresco é empregado uma chapa de aço soldada, esta será fixada com parafusos de ancoragem fixados (Alves; Ferreira; Cavalcante, 2019).

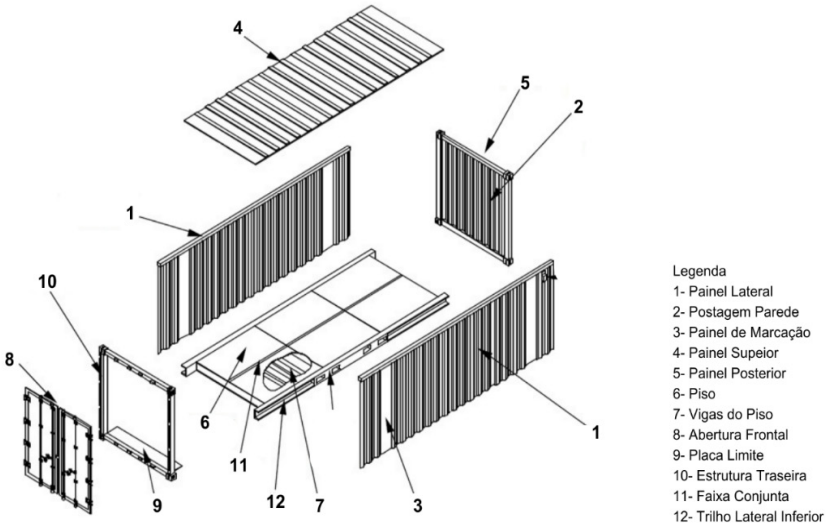


Figura 10: Componentes Estruturais do Container

Fonte: Residential Shipping Container Primer, 2019. Adaptado pela autora, 2023.

Sistemas: Hidráulico e Elétrico

As instalações elétricas e hidráulicas podem variar conforme o projeto, podendo ser aparentes ou não, seguindo as normas estabelecidas em sistemas de *Light Steel Framing* e *Dryawall,* sendo necessário a compatibilização de outros projetos para otimizar tempo e custos (França Junior, 2017. p. 50).

A tabela a seguir representa indicações de tipos de instalações e materiais adequados para cada uma, sendo que todas seguem instalações semelhantes ao utilizados em *Light Stell Frame* e métodos convencionais construtivos.

Outro fator importante é utilização de painéis fotovoltaicos, indo ao encontro da sustentabilidade ao reutilizar containers marítimos, a energia solar se mostra uma importante aliada ao projeto, pois garante a produção da energia a ser consumida pela edificação (França Junior, 2017. p. 53).

Tipo de Intalação	Água Fria	Água quente	Esgoto	Água Pluvial	GLP/Gás Natural	Instalações Elétricas
Material	PVC PEX PPR CPVC	PEX CPVC COBRE	PVC	PVC	COBRE AÇO GALV. LATÃO	PVC

Tabela 3 - Relação tipo de Material e sua aplicabilidade

Fonte: França Junior, 2017. Adaptado pela autora, 2023.

Revestimentos

Por ser um material que conduz calor e possui um péssimo isolamento acústico, e para ser reutilizado como residência, comércio ou serviço é preciso solucionar este problema, através isolamento térmico e acústico, como: manta de lã de Pet, Lã de Rocha, Lã de vidro, fibra cerâmica, isopor, entre outros (Alves; Ferreira; Cavalcante, 2019).

De acordo com França Junior (2017), quando não forem necessários apoios nas estruturas, os perfis de fixação dos painéis podem ser perfis formados a frio com espessura menor, semelhante ao utilizado no sistema *drywall,* podendo ser também perfis de madeira tratada como por exemplo o *pinus.* A seguir a tabela 4 expõe os tipos de materiais e suas aplicações para o melhor desempenho termoacústico utilizados no container, tais materiais podem ser utilizados nas paredes, forro e piso.

Material	Tratamento Térmico	Tratamento Acústico	Imagem
Lã de Vidro	Adequado	Adequado	
Lã de Rocha	Adequado	Adequado	
Lã de Pet	Adequado	Adequado	
Espuma de Poliuretano	Adequado	Adequado	
EPS	Adequado	Inadequado	

Tabela 4 - Aplicação de materiais: Termoacústicos

Fonte: França Junior, 2017. Adaptado pela autora, 2023.

Conforme a Tabela 4, os materiais apresentados são adequados ao uso térmico e acústico, somente o EPS não é recomendado para o tratamento acústico.

Referente ao fechamento interno e externo do container, França Junior (2017) observa que atualmente há poucos estudos a respeito do desempenho termoacústico em containers marítimos uados para a construção civil no Brasil, porém são seguidos métodos utilizados no *Light Still Frame.* Na tabela abaixo, apresenta recomendações da aplicabilidade dos materiais quanto ao fechamento externo e interno o container, para garantir um melhor benefício. Verifica-se na Tabela 7, existem algumas opções de fechamentos no mercado, podendo ser usado tanto interno quanto externo.

Material da Placa	Uso Interno	Uso Externo	Imagem
OSB	Adequado	Adequado	
Gesso Acartonado	Adequado	Inadequado	
Cimentícia	Adequado	Adequado	
PVC	Adequado	Adequado	
Aço/ Metal	Adequado	Adequado	
Vegetação	Inadequado	Adequado	

Tabela 5 - Aplicação de materiais: Fechamento

Fonte: França Junior, 2017. Adaptado pela autora, 2023.

Cobertura

A cobertura é um item que se tem mais danificações, por ser plana sofre com as intemperes, logo faz se necessário mais manutenção, pode ser inserido um segundo telhado com a inclinação indicada por cada tipo de telha (Figura 11(a)), ou até mesmo a coberta pode ser usada como teto verde (Figura 11(b)) com o intuito de reduzir o impacto da radiação solar, bem como reaproveitar a captação da água da chuva, e proporcionar aos vizinhos uma vista mais agradável através da vegetação.

(a) **(b)**

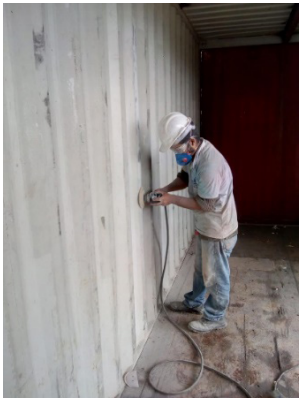
Figura 11 - Casa Container com segundo telhado e Escritório Container Teto Verde

Fonte: Weg, 2021 & Archdaily, 2016

Pintura

Para garantir o melhor desempenho da estrutura é necessário o lixamento da superfície, principalmente da parte externa a fim de evitar oxidação, ferrugem corrosão, entre outros. Alves; Ferreira e Cavalcante (2019), apontam alguns passos para o correto tratamento: Retirar a corrosão com lixadeira angular e/ou escova de aço rotativa ondulada, após lixar a superfície com uma lixadeira angular, em seguida utiliza-se uma lavadora de alta pressão com água quente e detergente neutro biodegradável, com objetivo de retirar óleo, graxa, poeira etc., (Figura 12 (a)).

Por fim, é realizado um tratamento com material ante corrosivo, na parte interna e externa, seguido da etapa da pintura, a qual recomenda-se utilizar tinta para metal, França Junior (2017), destaca que em caso de não aplicação de painéis termoacústicos, recomenda que seja realizada duas demãos de tintas tanto interno quanto no lado externo do container, (Figura 12 (b)).



(a) **(b)**

Figura 12 - Tratamento Container (a) Lixamento Superfície e (b) Pintura Superfície.

Fonte: São José Pinturas, 2023.

PROJETOS DE REFERÊNCIA – BENCHMARK

Nesta seção apresenta-se projetos realizados, no cenário internacional e nacional, que utilizam o container marítimo como método construtivo em ambientes de ensino e pesquisa.

Com o intuito de oferecer embasamento técnico e teórico bem como aprofundar a compreensão sobre o tema de construção sustentável no ambiente acadêmico. Para isso, foram escolhidos alguns projetos correlatos com a utilização do espaço no meio acadêmico, onde buscou-se propostas e concepções inovadoras utilizando o container marítimo que são: (i) Sala de aula/ biblioteca na cidade do Cabo África do Sul um projeto elaborado pelo Tsai Design e Studio; (ii) Laboratório em container do Instituto Butantan desenvolvido pela Container Box. (iii) Laboratório de vacinas Itinerário do Instituo Butantan. (iv) laboratório móvel de Análises e Sínteses do Centro Tecnológico Satc (CTSatc) e a Casa Eficiente em parceria com a Cersul. (v) Laboratório container Marker Space em Encantado- RS.

Escola Primária Vissershok Durbanville

A escola está localizada na cidade do Cabo na África do Sul, uma região predominantemente rural, a escola tinha como demanda uma sala de aula e uma sala de leitura, e, como resultado, o projeto foi elaborado de modo a criar um ambiente que atendessem os dois usos, através de um layout flexível o qual permitisse receber cerca de 25 crianças, com o objetivo de ser uma construção de baixo custo, utilizou-se um container de 40 pés, resultando em uma solução sustentável (Figura 13).

Para atender às necessidades das crianças, o design foi desenvolvido de forma multifuncional, incorporando diversos elementos; por essa razão, a escolha de um grande telhado com inclinação é justificada, uma vez que proporciona sombreamento e circulação de ar ao ser deslocado do container, e garante também o escoamento da água da chuva. Além disso, o projeto se ateve ao formato retangular original do container utilizado, sem haver subtração ou adição de outras formas.

Figura 13 - Demonstrativo da escola primária Vissershok Durbanville

Fonte: Tsai Design Studio, 2023. Editado pela autora, 2023.

As fachadas da edificação foram projetadas para amenizar o calor interno através da ventilação cruzada, com aberturas distribuídas em diferentes alturas em três fachadas, as quais também contribuem na iluminação natural indireta.

Através da utilização do container foi possível uma execução rápida e com menor custo. O arquiteto levou em consideração fatores como o clima e o entorno, criando espaços externos para práticas de atividades de brincadeiras com a área de jogos e, devido à topografia, foi possível criar uma espécie de anfiteatro, promovendo um espaço socializador.

Laboratório de Diagnostico PCR do Instituto Butantan

O segundo projeto analisado foi elaborado para fins de pesquisas do Instituto Butantan, o Laboratório de Diagnostico PCR, com nível de Biossegurança 2- NB-2, localizado na cidade de São Paulo (Figura 14). De acordo com a empresa idealizadora, Container Box, com a utilização de container marítimo foi possível reduzir em 90% as emissões de gases de efeito estufa, ao ser comparado com uma construção em alvenaria, os índices de emissão de carbono totalizaram 222,09 t/CO2e no laboratório desenvolvido em container, sendo que em alvenaria este índice seria acima de 2,200 t/CO2e (Medicina S/A, 2022).

Além de ser uma alternativa inovadora no setor de pesquisas, uma vez que o container é uma construção versátil e de baixo impacto ambiental, podendo receber inúmeras configurações, as quais garantem não somente a agilidade e rapidez de entrega, mas também oferece segurança e praticidade.

Figura 14 - Demonstrativo do Laboratório de Diagnostico PCR

Fonte: Medicina S/A, 2022.

O laboratório conta com uma área total de 249 metros quadrados, distribuídos em dois pavimentos, e conta com salas de biossegurança, antecâmara, sala de extração, sala de cadastro, deposito, vestiário masculino e feminino, banheiros e sala administrativa e um espaço de 75 metros quadrados equipado com máquinas climatizadas com tecnologia HVAC.

Laboratório de Vacinas do Instituto Butantan

Para o laboratório de vacinas do Instituo Butantan, o container foi utilizado como método construtivo o qual se tornou uma opção atraente neste segmento, com características que reforçam sua aplicabilidade: Arquitetônico, Social e Sustentável.

As necessidades do espaço eram de um local seguro e eficiente, sendo assim o projeto foi personalizado de acordo com as funções especificas do laboratório, com os equipamentos necessários para a execução realização de experimentos voltados para tal fim, como observa-se na Figura 15 b.

(a) **(b)**

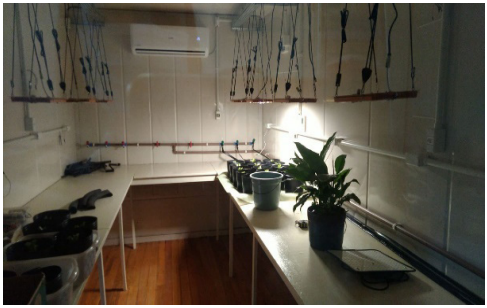
Figura 15: Laboratório Itinerante de Vacinas

Fonte: Martins, 2023.

Inicialmente o projeto era de um laboratório itinerante utilizado para testes de Covid nas cidades do interior de São Paulo (Figura 15 (a)), porém atualmente ganhou uma nova função no Instituto, tornando-se um laboratório para testes de eficiência das vacinas desenvolvidas pelos Instituto Butantan. O que corrobora com a funcionalidade do uso de container, podendo ser adaptado de acordo com as necessidades, bem como a sua flexibilidade de locação.

Laboratório Móvel de Análises e Sínteses

O laboratório móvel de Análises e Sínteses do Centro Tecnológico Satc (Figura 16.a), localizado na cidade de Criciúma-SC, tem como foco pesquisas na área do agronegócio, a escolha pelo container se deu pela praticidade em se adaptar atendendo as demandas do projeto, bem como a sua flexibilidade de instalação, podendo ser transportado. Na parte interna, o container foi adaptado para estudos e pesquisas através do monitoramento e o controle de variáveis (Figura 16 b).



(a) **(b)**

Figura 16 - Laboratório Móvel de Análises e Sínteses

Fonte: Vitali, 2022.

Outro projeto desenvolvido pela Satc em parceria com a Cersul, intitulado “Educação para Eficiência” (Figura 17), trata-se de uma casa eficiente construída em um container, projeto pioneiro na região cujo objetivo é estimular o consumo racional de energia elétrica, apresentado aos alunos e a comunidade, exemplos de como economizar energia e reduzir gastos de energia elétrica no cotidiano e de fácil acesso.

Figura 17 - Laboratório Móvel - Casa Eficiente

Fonte: Somariva, 2018.

Maker Space

As escolas de ensino fundamental estão em busca de recursos que despertem o interesse dos alunos pela tecnologia, diante disso a prefeitura do município de Encanto no RS, elaborou um projeto denominado Espaço do Fazer, com o objetivo de atender alunos do ensino fundamental. Para a concepção do projeto, o container foi a opção escolhida o qual recebeu tratamento acústico, para melhor desempenho das atividades internas (Figura 18). Com a reutilização do container, despertando o interesse pela importância da redução dos impactos causados pelo setor construtivos contribuindo assim com o meio ambiente.

Figura 18 - Demonstrativo do Marker Space

Fonte: Dallaqua, 2022.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante desse cenário, o setor da construção civil apresenta-se como um campo para a implementação de mecanismos e opções que não apenas mitigam os efeitos adversos da cadeia construtiva, mas também propiciam uma análise aprofundada dos impactos gerados pelo setor. Ao analisar os objetivos deste capítulo e correlacionando-os com os temas de educação e sustentabilidade, pode-se apontar pelo menos sete dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são: 1. Educação de Qualidade; 5. Igualdade de Gênero; 7. Energias Renováveis; 10. Redução das Desigualdades; 11. Cidades e Comunidades Sustentáveis; 12. Produção e Consumo Sustentável; e 13. Combate às Alterações Climáticas (Figura 4). Portanto, a interseção entre inovações construtivas, como a reutilização de containers, e destaca-se como uma oportunidade estratégica para alcançar resultados dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Assim, considera-se que a inclusão de práticas sustentáveis na arquitetura, por meio da reutilização de containers, não apenas atende às demandas por espaços educacionais, mas também se converte em um instrumento eficaz para promover mudanças positivas nos indicadores de sustentabilidade. Essa abordagem integrativa reforça a importância de ações convergentes entre educação, sustentabilidade e construção civil, visando não apenas à satisfação das necessidades presentes, mas também à promoção de um método alternativa de baixo impacto ambiental e custo.

Por fim, ressalta-se a necessidade contínua de pesquisas e práticas inovadoras no campo da construção sustentável, consolidando parcerias no tríplice hélice. A promoção de ambientes educacionais construídos de maneira sustentável não apenas contribuirá para a melhoria da qualidade de ensino, mas também desempenha um papel fundamental na construção de sociedades mais resilientes e conscientes na busca pela promoção da sustentabilidade.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi parcialmente apoiada pela FACEPE (Fundação de Amparo à Pesquisa de Pernambuco) ao longo do projeto com referências APQ-0616-9.25/21 e APQ-0642-9.25/22. Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq) de N°407531/2018-1, 303293/2020-9, 405385/2022-6, 405350/2022-8 e 40666/2022-3. O.H.A.J. agradece ao apoio do Programa em Engenharia de Sistemas Energéticos (PPGESE) Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9050:** Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ALVES, José Victor Pontes; FERREIRA, Rosimery da Silva; CAVALCANTE, Roberta Paiva. **Containers**–uma nova alternativa para a construção civil. Estudo direcionado para projetos residenciais. Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, n. 46, p. 19-32, 2019.

ARAUJO, Camila Lopes Zequini Rodrigues. **Diretrizes para projetos de arquitetura modular sob a perspectiva da Economia Circular**. 2022.

ARCHDAILY. **Container Rodrigo Kirck** Arquitetura. 2016. Disponível em: https://www.archdaily.com.br/br/801954/container-rodrigo-kirck-arquitetura. Acesso em: 07 de set. de 2023.

BIOCLIMATISMO. **Zoneamento Bioclimático Brasileiro**. Blog da Arquitetura Bioclimática. 2023. Disponível em: https://bioclimatismo.com.br/bioclimatismo/zoneamento-bioclimatico-brasileiro/. Acesso em: 10 de set. de 2023.

BRASIL. **Portos e Aeroportos**. 2020. Disponível em: https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br. Acesso em: 03 de out. de 2023.

BUENO, C. A. P. **Análise das condições de desempenho e acessibilidade no reuso de contêineres para fins de comércio e serviços.** 2019. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

CAMILOTTI, Ângliston Tainã. **Avaliação do desempenho térmico de construções em contêineres**. 2023. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

DALAQUA, Bruno. **Segundo laboratório container Maker Space é inaugurado em Encantado.** 2022. Disponível em: https://jornalforcadovale.com.br/destaques/segundo-laboratorio-container-maker-space-e-inaugurado-em-encantado/. Acesso em: 03 de fev. de 2024.

DEGANI, Clarice *et al.* **Proposta de método prático para avaliar o desempenho ambiental no ciclo de vida da construção**. **Concreto e Construções**. 2020. Disponível em: https://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_construcoes/pdfs/edicao100/RevistaConcretoIBRACON100_PesquisaDesenvolvimento1.pdf. Acesso em: 13 de nov. de 2023.

FRANÇA JUNIOR, Adelmo Magalhães de. **Análise estrutural de contêineres marítimos utilizados em edificações.** 2017.

GBC BRASIL. **Conheça a Certificação LEDD**. 2023. Disponível em: https://www.gbcbrasil.org.br/certificacao/certificacao-leed/. Acesso em: 15 de nov. de 2023.

GONÇALVES, Daniel Bertoli; RIBEIRO, Edson. **O reuso de containers marítimos na construção civil sob a perspectiva da economia circular**. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais, p. 107-119, 2022.

IDL EXPRESS. **Medidas de Container Marítimo**. 2023. Disponível em: https://www.idlexpress.com.br/ferramentas.asp?id=cmar. Acesso em: 09 de set. de 2023.

INCONTAINER. **12 Vantagens do Container.** 2017. Disponível em: https://www.incontainer.org/. Acesso em: 09 de set. de 2023.

JUSTINO, Bárbara Maria de Paula et al. Contêiner: do descarte portuário à aplicação arquitetônica. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 14632-14652, 2021.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K. **Arquitetura escolar**: o projeto do ambiente de ensino. São Paulo: Oficina de Textos, 247p, 2011.

LUIZ, André. **Container para escritório o Estaleiro Jurong Aracruz**. 2018. Disponível em: https://projetos.habitissimo.com.br/projeto/container-escritorio-para-o-estaleiro-jurong-aracruz. Acesso em: 18 de set. de 2023.

MARTINS, Samuel. **Laboratório em container:** Conheça o projeto feito para o instituto Butantan. 2023. Disponível em: https://www.locarescasacontainer.com.br/laboratorio-em-container-conheca-o-projeto-feito-para-o-instituto-butantan/. Acesso em: 03 de fev. de 2024.

MEDICINA S/A. **Instituto Butantan inaugura 1º laboratório Carbono Zero da AL**. 2022. Disponível em: https://medicinasa.com.br/butantan-carbono-zero/. Acesso em: 03 de fev. de 2024.

MUSSNICH, Luiza Barreto. **Retrofit em containers marítimos para reuso na arquitetura e sua viabilidade**. Revista Especialize On-line IPOG, Goiânia, v. 1, n. 10, p. 1-22, 2015. Disponível em: https://silo.tips/download/retrofit-em-containers-maritimos-para-reuso-na-arquitetura-e-sua. Acesso em: 09 de set. de 2023.

ODS. **Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.** 2023. Disponível em: https://odsbrasil.gov.br/. Acesso em: 08 de out. de 2023.

PIOVESAN, Armando; TEMPORINI, Edméa Rita. **Pesquisa exploratória**: procedimento metodológico para o estudo de fatores humanos no campo da saúde pública. Revista de saúde pública, v. 29, p. 318-325, 1995.

PORTAL METÁLICA. **Containers de navio são matéria-prima para a construção de casas**. 2021. Disponível em: https://metalica.com.br/conteineres-de-navio-se-tornam-materia-prima-para-a-construcao-de-casas-4/. Acesso em: 18 de set. de 2023.

RESIDENTIAL SHIPPING CONTAINER PRIMER. **Componentes estruturais e terminologia do recipiente de envio**. 2019. Disponível em: https://www.residentialshippingcontainerprimer.com/CONTAINER%20COMPONENTS%20AND%20TERMINOLOGY.html. Acesso em: 22 de set. de 2023.

SANTO, Samir Paiva do Espírito; BASTOS, Jose Roberto de Magalhaes. **Clínica container:** transformando containers marítimos em ambientes clínicos. 2022.

SANTOS, Carolina Neiva ***et al***. **Construção modular**: utilização de containers como ambiente construído. 2017.

SÃO JOSÉ PINTURAS. **Pintura de Container**. 2023. Disponível em: https://sanjosepinturas.com.br/pintura-de-containers/. Acesso em: 01 de out. de 2023.

SOMARIVA, Aline. **Presidentes de cooperativas de energia do estado conhecem projeto de eficiência energética Cersul**. 2018. Disponível em: https://www.cersul.com.br/noticia/144/presidentes-de-cooperativas-de-energia-do-estado-conhecem-projeto-de-eficiencia-energetica-cersul. Acesso em: 03 de fev. de 2024.

SOUSA, Marcelo Luriê; CAMPOS, Gevair. **O Uso de Containers na construção civil como alternativa aos sistemas convencionais**. Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo, v. 7, n. 3, p. 214-232, 2022.

SOUZA, Andressa Carrucci de *et al*. **Viabilidade de projetos em containers para habitações de interesse Social.** 2021. Disponível em: https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstreams/c93ad3bb-0a9d-4a97-b688-7fb0514f0548/download. Acesso em: 03 de dez. de 2023.

TAVARES, Sérgio Fernando ***et al***. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006.

TORRES, Geovane Petrungaro et al. **Métodos construtivos sustentáveis:** reutilização de containers na construção civil. Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula, v. 3, n. 3, p. 1-15, 2020.

TSAI DESIGN STUDIO. **Sala de aula do recipiente Vissershok**. 2023. Disponível em: https://www.tsaidesignstudio.com/architecture/vissershok-classroom. Acesso em: 07 de set. de 2023.

VASQUES, CCPCF; PIZZO, L. M. B. F. **Comparativo de sistemas construtivos, convencional e wood frame em residências unifamiliares**. São Paulo: Unilins, 2014.

VITALI, Marli. **Pesquisa promove testes de fertilizante híbrido em ambiente automatizado.** 2022. Disponível em: https://unisatc.com.br/pesquisa-promove-testes-de-fertilizante-hibrido-em-ambiente-automatizado/. Acesso em: 03 de fev. de 2024.

WEG**. Casa container:** confira 4 projetos e dicas de construção. 2021. Disponível em: https://www.weg.net/tomadas/blog/arquitetura/casa-container-confira-4-projetos-e-dicas-de-construcao/. Acesso em: 25 de set. de 2023.

CAPÍTULO 5

PRECIPITAÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO INDUZIDO POR UREASE NA ENGENHARIA CIVIL: UMA REVISÃO INTRODUTÓRIA

Data de submissão: 09/02/2024 *Data de aceite: 01/04/2024*

Luiza Beatriz Gamboa Araújo Morselli
Universidade Federal de Pelotas, UFPel
Pelotas - Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/2217724221930510

Jessica Torres dos Santos
Universidade de Lisboa - Lisboa - Portugal
http://lattes.cnpq.br/8535897129145784

Lara Alves Gullo Do Carmo
Universidade Federal de Pelotas, UFPel
Pelotas - Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/7834385871356318

Julia Kaiane Prates Da Silva
Universidade Federal de Pelotas, UFPel
Pelotas - Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/8043172936883765

Caroline Menezes Pinheiro
Universidade Federal de Pelotas, UFPEL
Pelotas - Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/5984557031030431

Guilherme Pereira Schoeler
Universidade Federal de Pelotas - UFPel
Pelotas – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/6241607536410111

Gustavo Luís Calegaro
Universidade Federal de Pelotas - UFPel
Pelotas – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/5052053708370102

Rafael Miritz Bartz
Universidade Federal de Pelotas - UFPel
Pelotas – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/3237020633105128

Alessandra Magnus Lazuta
Universidade Federal de Pelotas - UFPel
Pelotas – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/6787125295859936

Daniele Martin Sampaio
Universidade Federal de Pelotas - UFPel
Pelotas – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/7326936381804224

Pierre-Yves Mahieux
La Rochelle Université
La Rochelle, França

Robson Andreazza
Universidade Federal de Pelotas, UFPel
Pelotas - Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/5706766977817721

RESUMO: Com a intensificação pela busca de novas técnicas sustentáveis para a construção civil, a técnica de biocimentação através de processos biológicos da precipitação de carbonato de cálcio por reações químicas de urease (*Ureolytic-Induced Carbonate Precipitation* - UICP),

que pode ser induzida microbiologicamente pela ação de bactérias (*Microbially induced calcium carbonate precipitation* – MICP) ou pela ação de enzimas urease derivadas de uma fonte vegetal (*Enzyme induced calcium carbonate precipitation* - EICP), tem se mostrado promissora nesse setor. O objetivo deste trabalho foi descrever as pesquisas científicas atuais sobre a técnica de UICP, além de identificar principais parâmetros, fatores e aplicações dos processos de biocimentação induzidos por ação de bactérias e de enzimas na área de engenharia civil. São apresentadas aplicações desses métodos em geotecnia e materiais cimentícios, destacando melhorias na resistência mecânica, estabilidade geotécnica e durabilidade dos materiais tratados. As pesquisas têm demonstrado que a EICP oferece benefícios significativos se comparados à MICP, desde a sua simplicidade de aplicação até a sua independência de oxigênio e capacidade de preenchimento de poros menores. No entanto, a ausência de microrganismos pode afetar a morfologia e a resistência do carbonato precipitado na EICP. Essa análise crítica é fundamental para direcionar pesquisas futuras e aplicações práticas, visto que os processos de EICP e MICP representam formas sustentáveis e promissoras para a construção civil e contribuem para o avanço no campo da biocimentação.
PALAVRAS-CHAVE: biocimentação; técnicas sustentáveis; UICP; EICP; MICP.

UREASE-INDUCED CALCIUM CARBONATE PRECIPITATION IN CIVIL ENGINEERING: AN INTRODUCTORY REVIEW

ABSTRACT: From the intensification of the search for new sustainable techniques for civil construction, the technique of biocementation through biological processes of calcium carbonate precipitation by chemical reactions of urease (Ureolytic-Induced Carbonate Precipitation - UICP), which can be induced microbiologically by the action of bacteria (Microbially induced calcium carbonate - MICP) or by the action of urease enzymes derived from a plant source (Enzyme induced calcium carbonate precipitation (EICP) have shown promise in this sector. The aim of this work was to describe current scientific research on the UICP technique, as well as to identify the main parameters, influencing factors and applications of biocementation processes induced by the action of bacteria and enzymes in the area of civil engineering. Applications of these methods in geotechnics and cementitious materials are presented, highlighting improvements in mechanical strength, geotechnical stability and durability of treated materials. Research has shown that EICP offers significant benefits compared to MICP, from its simplicity of application to its oxygen independence and ability to fill smaller pores. However, the absence of microorganisms may affect the morphology and strength of precipitated carbonate in EICP. This critical analysis is critical to direct future research and practical applications, as EICP and MICP processes represent sustainable and promising forms for civil construction and contribute to the advancement in the field of biocementation.
KEYWORDS: biocementation; sustainable techniques; UICP; EICP; MICP.

INTRODUÇÃO

A busca de novas técnicas para a fabricação de materiais sustentáveis de construção civil tem sido intensificada nas últimas décadas. Além da necessidade da redução do impacto ambiental causado pela construção, o desenvolvimento de novos materiais sustentáveis e econômicos precisam suprir a demanda do crescimento populacional e crescimento da infraestrutura urbana.

Uma dessas técnicas é a biocimentação através de processos biológicos da precipitação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), que pode ser induzida microbiologicamente pela ação de bactérias como *Bacillus pasteurii*, *Sporosarcina pasteurii* (*Microbially induced calcium carbonate precipitation* – MICP) ou pela ação de enzimas urease derivadas de uma fonte vegetal (*Enzyme induced calcium carbonate precipitation* - EICP). A MICP e a EICP são dois caminhos para a mesma finalidade. No entanto, esses são métodos diferentes no que se trata de cristalização do $CaCO_3$ e do mecanismo de precipitação (ARAB et al., 2021).

As reações químicas de urease ou *Ureolytic-Induced Carbonate Precipitation* (UICP) que levam à precipitação de carbonato de cálcio em ambos os processos (MICP e EICP) são as seguintes: a enzima urease hidrolisa um mol de ureia ($CO(NH_2)_2$) em um mol de amônia (NH_3) e um mol de ácido carbâmico (NH_2COOH) (Eq. 1), que é então hidrolisado em outro mol de amônia mais um mol de ácido carbônico (H_2CO_3) (Eq. 2). Íons carbonato (CO_3^{2-}), íons amônio (NH_4^+) e íons hidróxido (OH^-) se equilibram em água, como resultado das reações anteriores (Eq. 3 e 4), e aumentam a alcalinidade da solução. A equação 5 resume as quatro equações anteriores e indica que a hidrólise de um mol de ureia produz dois mols de amônio e um mol de íons carbonato. Na presença saturada de íons cálcio (Ca^{2+}), um mol de íon carbonato se precipita em um mol de carbonato de cálcio (Eq. 6) (IAMCHATURAPATR et al. 2022; SAIF et al., 2022).

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow NH_2COOH + NH_3 \quad (1)$$
$$NH_2COOH + H_2O \rightarrow NH_3 + H_2CO_3 \quad (2)$$
$$2NH_3 + 2H_2O \rightarrow 2NH_4+ + 2OH^- \quad (3)$$
$$2OH^- + H_2CO_3 \rightarrow CO_3^{2-} + 2H_2O \quad (4)$$
$$CO(NH_2)_2 + 2H_2O \rightarrow urease \rightarrow 2NH_4^+ + CO_3^{2-} \quad (5)$$
$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 \quad (6)$$

O $CaCO_3$ produzido por hidrólise da ureia age como ligante das partículas do solo ou areia para estabilização geotécnica (AHENKORAH et al., 2021) ou, ainda, influenciando algumas propriedades dos materiais como resistência à água e resistência mecânica de tijolos (ARAB et al., 2021; CUCCURULLO et al., 2020). No uso em materiais da construção civil, tanto o processo microbiológico como o processo enzimático podem ainda ser utilizados como estratégias para a autocura de fissuras em materiais cimentícios. Conforme Baffoe e Ghahremaninezhad (2022), essa é uma área emergente neste campo de pesquisa.

A biocimentação pode ser utilizada isoladamente de forma eficiente, sem mistura de cimento, reduzindo os efeitos nocivos associados à produção do cimento (ALMAJED et al., 2020). O processo da UICP é um método verde, sustentável e ecológico, que contribui na redução da toxicidade do solo (KULANTHAIVEL et al., 2022), no caso de aterros sanitários e áreas degradadas.

Considerando as diversas possibilidades de aplicação da UICP na engenharia civil, esse trabalho teve como objetivo descrever as pesquisas científicas mais atuais sobre o tema e os principais parâmetros dos processos de MICP e EICP.

METODOLOGIA

Para a realização desta pesquisa, foi feita uma revisão de literatura acerca das perspectivas do uso dos métodos de EICP e MICP na engenharia civil. Utilizou-se, para isso, o portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o Portal *Science Direct* da Elsevier, com as seguintes palavras-chave: "*induced calcium carbonate precipitation*"; "*EICP*"; "*MICP*"; "*cement*"; "*concrete*". Foram selecionados os artigos científicos mais relevantes com data de publicação nos últimos cinco anos referente ao mês de setembro de 2023, quando a pesquisa foi realizada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fatores que influenciam as reações de UICP

Se tratando do processo microbiológico MICP, Kulanthaivel et al. (2022) constataram a influência das diferentes espécies e concentrações de bactérias e do meio de cimentação utilizado, sendo os meios mais confiáveis e adequados: fibras, pó de casca de ovo e calcário.

Apesar disso, Schwantes-Cezario et al. (2022) mostram que ainda não está clara, na literatura, a influência de fatores como a concentração ideal de bactérias, as fontes de cálcio, a temperatura, a umidade e a presença de água para a aplicação de bactérias visando a reparação de fissuras em materiais cimentícios.

Já se tratando do processo enzimático, de acordo com Saif et al. (2022), a eficiência das reações de urease dependem de diversos fatores, tais como o modo de aplicação da enzima urease, da concentração de ureia, da fonte e da concentração dos íons de cálcio, da temperatura, do pH, do tempo de cura e da composição química da água. Corroborando, Ahenkorah et al. (2021) indicam que são fatores que afetam em específico a eficácia do processo EICP: a fonte e a atividade da enzima urease, a concentração dos constituintes químicos como ureia, cloreto de cálcio e enzima urease na solução, além do pH, da temperatura e a química do ambiente hospedeiro.

Além disso, de maneira geral, as características do hospedeiro, como características geotécnicas, mineralógicas da areia ou do solo interferem no tratamento com EICP e MICP (ALWALAN et al., 2023; ARPAJURAKUL et al., 2021), além do número de ciclos de aplicação do tratamento e do método de aplicação da solução enzimática, os quais influenciam nas propriedades mecânicas do solo (ALWALAN et al., 2023). Solos com alta plasticidade dificultam a passagem da solução bacteriana aquosa no uso da MICP, prejudicando a atividade e a formação de carbonato de cálcio (ARPAJURAKUL et al., 2021).

O aumento da temperatura em altos níveis pode levar a uma desnaturação progressiva da enzima urease na aplicação da EICP (CUCCURULLO et al., 2022). Na pesquisa de Cuccurullo et al. (2022), os reagentes utilizados foram cloreto de cálcio e ureia, e a forma de extração de proteínas das enzimas urease demonstrou influenciar nos resultados finais, onde a mistura entre o extrato e o pó dos grãos de soja promoveram um resultado mais apurado em comparação ao uso isoladamente.

Conforme Fan et al. (2022), a EICP por soja é significativamente afetada pelo pH e pela concentração de ureia. Os autores realizaram um estudo experimental sobre a EICP com grãos de soja, e os seguintes componentes químicos: ureia ($CO(NH_2)_2$), cloreto de cálcio ($CaCl_2$), hidróxido de sódio (NaOH), ácido hidroclorídrico (HCl) e cloreto de níquel (II) hexahidratado ($NiCl_2.6H_2O$). Ao submergir por 6 a 24h os corpos de prova de concreto no compósito a altas temperaturas (entre 300 e 500ºC), camadas de precipitações brancas de cristais de calcita apareceram rapidamente na superfície do material, com espessura de 2mm, e proporcionaram uma redução de taxa de absorção de água de 70%. A atividade de urease foi analisada com o pH entre 5 e 11, sendo os melhores resultados com o pH entre 6 e 9. Porém, ao exceder esse patamar de pH, a atividade de urease baixou significativamente.

Baffoe e Ghahremaninezhad (2022) pesquisaram a influência de cinco proteínas com características diferentes nos processos da EICP no ambiente cimentício: concentrado protéico de soro de leite, lisozima (proteína extraída de ovo branco), leite em pó desnatado, imunoglobulina bovina derivada do soro isolado proteico e albumina. Os resultados mostraram que as amostras contendo albumina e *whey protein* obtiveram menor índice de permeabilidade de água, comparado ao controle, o que foi atribuído à baixa porosidade e à propriedade hidrofóbica da superfície interna das amostras com essas proteínas.

Aplicação de UICP em geotecnia

Em solos, a MICP é utilizada para melhorar propriedades como resistência ao cisalhamento, ductilidade e redução de permeabilidade, inchamento, viscosidade e fragilidade. Seu uso é mais indicado para solos não coesos, devido à maior capacidade de permeação de bactérias através dos poros do solo (KULANTHAIVEL et al., 2022).

As melhores condições químicas para a indução da atividade de MICP pela bactéria *Sporosarcina Pasteurii* em três tipos de solos naturais de grãos finos foi estudado por Arpajirakul et al. (2021). Os resultados demonstraram que houve aumento da rigidez e da resistência ao cisalhamento das amostras tratadas com as bactérias, o que coincidiu com o aumento da quantidade de calcita precipitada. O aumento da resistência teve influência das características naturais de cada solo, como por exemplo no caso da argila com alta plasticidade não ter permitido a permeabilidade eficiente da solução bacteriana, resultando em um menor grau de atividade por MICP.

Iamchaturapatr et al. (2022) analisaram as características de um solo arenoso tratado com EICP com reação acelerada e fibras naturais de linho. Os resultados demonstraram que a reação de biocimentação demorou dois dias para iniciar e terminou em seis. Os autores verificaram a relação da reação de biocimentação ao aumento do pH (superior a 7) e a redução da reação quando o mesmo retorna a pH 7, atingindo seu máximo no terceiro dia de reação.

Por meio da EICP para estabilização de solos, Cuccurullo et al. (2022), utilizaram proteína hexamérica encontrada em tecidos de plantas, como a soja (*soybeans*), para desenvolver um estabilizante simples e de baixo custo aplicável em solos compactados. Os autores fizeram uso da soja de duas formas: em extrato e em pó, sendo que os dois se mostraram boas fontes de enzimas urease como catalisadores de hidrólise de ureia, porém quando as duas formas foram aplicadas juntas, elas demonstraram melhores resultados do que quando aplicadas em separado. Os pesquisadores relataram que o tratamento com EICP melhorou a resistência à imersão em água, resistência à compressão não confinada e aumentou a durabilidade dos produtos. Através de análises de difração de raios-X, o tratamento de EICP apresentou os minerais caulinita, microlina intermediária, muscovita, quartzo e calcita.

O esforço por cisalhamento de “bio areia cimentada” a partir de EICP foi analisado por Alwalan et al. (2023), em que quatro diferentes métodos de solução de EICP foram aplicados: por spray, mistura e compactação, percolação e injeção. Os resultados mostraram que o método influencia a biocimentação do solo e a distribuição da precipitação de $CaCO_3$. Com isso, o método de injeção proporcionou os melhores resultados para cisalhamento e maior rugosidade aos grãos do solo.

Aplicação de UICP em materiais cimentícios

No concreto, a MICP pode ser utilizada para curar futuras fissuras, melhorar a resistência à compressão, absorção de água e durabilidade (KULANTHAIVEL et al., 2022).

Schwantes-Cezario et al. (2022) analisaram o potencial de onze bactérias isoladas de cavernas da Amazônia, localizadas no Brasil, para autocura de fissuras em materiais cimentícios, como concreto, a partir de precipitação de carbonato de cálcio. A bactéria com melhor resultado para precipitação foi a *Bacillus subtilis*, a qual gerou cristais de calcita e vaterita no material hospedeiro. A aplicação de MICP aumentou a resistência dos espécimes após 63 dias de tratamento e cura do concreto sem o uso de ureia ou fonte de cálcio.

Na pesquisa desenvolvida por Mi et al. (2023) através dos processos de MICP com a bactéria *Sporosarcina pasteurii* DSM 33 e EICP na performance de concretos com agregados reciclados, e os resultados com uso de microrganismos demonstraram a formação principalmente de cristais de vaterita esféricos, enquanto que o processo com enzimas apresentou vaterita, calcita e aragonita. Os autores viabilizaram um meio de cultivo livre de cloretos – que podem danificar a armadura em concretos - através da substituição do cloreto de sódio pelo acetato de sódio, resultando em um crescimento bacteriano ainda maior.

A resistência à tração das amostras com proteínas com o uso de EICP em material cimentício na pesquisa de Baffoe e Ghahremaninezhad (2022) foi maior que a da amostra de controle, o que pode ser explicado pela menor porosidade e distribuição do tamanho dos poros apresentados pelas amostras desenvolvidas, além de melhorias na adesão interfacial dos constituintes fornecidos pelas proteínas.

Segundo Fan et al. (2022), a EICP por soja melhora as propriedades de materiais cimentantes, como a durabilidade e resistência mecânica após 3 dias de tratamento. Porém, de acordo com Baffoe e Ghahremaninezhad (2022), os mecanismos subjacentes ao efeito das proteínas nos processos da EICP em materiais cimentícios não são totalmente compreendidos na literatura. Necessitando, assim, de pesquisas mais prolongadas no que diz respeito à durabilidade das estruturas cimentícias tratadas com EICP.

Desenvolvimento de produtos para a engenharia civil com uso de UICP

Arab et al. (2021) investigaram o processo da EICP com biopolímero de alginato de sódio para a produção de biotijolos para a construção civil, como alternativa ao uso de cimento e argila. Os resultados mostraram que os biotijolos são comparáveis a vigas tratadas com cimento em termos mecânicos e podem ser uma alternativa ecologicamente correta comparada aos tijolos convencionais.

De acordo com Xie et al. (2023), a EICP tem um efeito benéfico na penetração interna mais profunda de precipitação de carbonato e na uniformidade da cobertura superficial dos agregados de concretos reciclados, em comparação com a MICP. Conforme os autores, após o tratamento por EICP, a massa dos agregados aumentou de 1 a 3,5% e houve uma redução de 20,9% de absorção de água saturada dos agregados. A deposição de $CaCO_3$ aumentou com o aumento de temperatura e o pH entre 7 e 10 teve pouco efeito sobre o processo.

Vantagens de desvantagens da EICP e MICP

Conforme Ahenkorah et al. (2021), a EICP possui algumas vantagens com relação à MICP, tais como a simplicidade de aplicação, a independência de oxigênio no processo e o menor tamanho das enzimas (aproximadamente 0,012 µm ou 120 Å) comparado ao das bactérias (na ordem de microns) normalmente utilizadas e, por isso, a EICP é mais aplicável à vários tipos de solos. Porém, a ausência de bactérias pode resultar na falta de sítios de nucleação na EICP, afetando a morfologia e resistência do $CaCO_3$ precipitado e do solo tratado.

Para Saif et al. (2022), ocorre uma vantagem na precipitação de carbonato de cálcio por urease em relação ao uso de ligantes hidráulicos como cimento e cal, uma vez que a dependência de diversos fatores para a estabilização da UICP facilita o controle da taxa de reação, sabendo-se que é possível o controle do pH, da temperatura e da concentração dos reagentes, por exemplo. Além disso, o uso de EICP apresenta potencial para melhorar o cisalhamento de solos pouco coesivos até 2,3 vezes do que solos não tratados (ALWALAN et al., 2023).

Sobre as vantagens da MICP, Kulanthaivel et al. (2022), na sua revisão bibliográfica acerca do uso de MICP, perceberam que essa tecnologia é a mais indicada para reforçar e cicatrizar o concreto e a argamassa, além de ser um bom método para estabilização do solo através da formação de cristais de calcita.

CONCLUSÕES

Diversos aspectos influenciam a eficiência dos tratamentos de UICP, tais como a espécie de microrganismos ou das enzimas urease utilizadas, pH, temperatura, tipos e quantidade de componentes químicos empregados e composição física e química do material hospedeiro. Segundo as pesquisas encontradas, a EICP tem demonstrado maiores benefícios, em comparação com a MICP, desde sua simplicidade de aplicação, independência de oxigênio e capacidade de preencher menores poros. No entanto, a ausência de microrganismos pode resultar na falta de sítios de nucleação, afetando a morfologia e resistência do carbonato precipitado na EICP. Ambos os processos de biocimentação são formas sustentáveis e promissoras para a área de materiais de construção.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer às agências financiadoras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), CAPES-PRINT (UFPel), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), e à La Rochelle Université e à Universidade Federal de Pelotas pelo apoio e incentivo.

REFERÊNCIAS

AHENKORAH, Isaac; RAHMAN, Md Mizanur; KARIM, Md Rajibul; BEECHAM, Simon. Enzyme induced calcium carbonate precipitation and its engineering application: A systematic review and meta-analysis. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 308, n. December 2020, p. 125000, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125000.

ALMAJED, Abdullah; ABBAS, Husain; ARAB, Mohamed; ALSABHAN, Abdullah; HAMID, Wagdi; AL-SALLOUM, Yousef. Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP)-Based methods for ecofriendly stabilization of different types of natural sands. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 274, p. 122627, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122627.

ALWALAN, Mohammed; ALMAJED, Abdullah; LEMBOYE, Kehinde; ALNUAIM, Ahmed. Direct Shear Characteristics of Enzymatically Cemented Sands. **KSCE Journal of Civil Engineering**, [S. l.], v. 27, n. 4, p. 1512–1525, 2023.

ARAB, Mohamed G.; OMAR, Maher; ALMAJED, Abduallah; ELBAZ, Yousef; AHMED, Amira H. Hybrid technique to produce bio-bricks using enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) and sodium alginate biopolymer. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 284, p. 122846, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122846.

ARPAJIRAKUL, Soyson; PUNGRASMI, Wiboonluk; LIKITLERSUANG, Suched. Efficiency of microbially-induced calcite precipitation in natural clays for ground improvement. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 282, p. 122722, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122722.

BAFFOE, Elvis; GHAHREMANINEZHAD, Ali. The effect of biomolecules on enzyme-induced calcium carbonate precipitation in cementitious materials. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 345, n. June, p. 128323, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128323.

CUCCURULLO, A.; GALLIPOLI, D.; BRUNO, A. W.; AUGARDE, C.; HUGHES, P.; LA BORDERIE, C. Earth stabilisation via carbonate precipitation by plant-derived urease for building applications. **Geomechanics for Energy and the Environment**, [S. l.], v. 30, p. 100230, 2022. DOI: 10.1016/j.gete.2020.100230.

FAN, Yanan; DU, Hongxiu; WEI, Hong; ZHAO, Teng. Experimental Study on Urease Activity and Cementation Characteristics of Soybean. **Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition**, [S. l.], v. 37, n. 4, p. 636–644, 2022. DOI: 10.1007/s11595-022-2578-z.

IAMCHATURAPATR, Janjit; PIRIYAKUL, Keeratikan; PETCHERDCHOO, Aruz. Characteristics of sandy soil treated using EICP-based urease enzymatic acceleration method and natural hemp fibers. **Case Studies in Construction Materials**, [S. l.], v. 16, n. October 2021, p. e00871, 2022. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e00871.

KULANTHAIVEL, P.; ARUN KUMAR, M.; KRISHNARAJA, A. R.; KAYALVIZHI, V. S.; SARANYA, K. Applications of BCCP technology on civil engineering – A review. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 65, p. 1213–1221, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.179.

MI, Tangwei; PENG, Ligang; YU, Keqiong; ZHAO, Yuxi. Optimizing microbial- and enzyme-induced carbonate precipitation treatment regimes to improve the performance of recycled aggregate concrete. **Case Studies in Construction Materials**, [S. l.], v. 19, n. June, p. e02261, 2023. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02261.

SAIF, Ahsan; CUCCURULLO, Alessia; GALLIPOLI, Domenico; PERLOT, Céline; BRUNO, Agostino Walter. Advances in Enzyme Induced Carbonate Precipitation and Application to Soil Improvement: A Review. **Materials**, [S. l.], v. 15, n. 3, 2022. DOI: 10.3390/ma15030950.

SCHWANTES-CEZARIO, N.; CREMASCO, L. V.; MEDEIROS, L. P.; TEIXEIRA, G. M.; ALBINO, U. B.; LESCANO, L. E. A. M.; MATSUMOTO, L. S.; OLIVEIRA, A. G. de; SILVA, P. R. C. da; TORALLES, B. M.. Potential of cave isolated bacteria in self-healing of cement-based materials. **Journal of Building Engineering**, [S. l.], v. 45, n. January 2021, 2022. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103551.

XIE, Dezhi; ZHANG, Rui; WANG, Jianyun. The influence of environmental factors and precipitation precursors on enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) process and its application on modification of recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 395, n. February, p. 136444, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136444.

CAPÍTULO 6

REMEDIAÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA DA MINA DE URÂNIO OSAMU UTSUMI (MG) COM BIOCARVÕES EM BARREIRA REATIVA PERMEÁVEL EM LABORATÓRIO

Data de Submissão 12/03/2024 *Data de aceite: 01/04/2024*

Camila de Campos Souza
Instituto de Geociências / Unicamp
Campinas-SP
http://lattes.cnpq.br/0243234320162336

Aline Renee Coscione
Instituto Agronômico - IAC/SP
Campinas-SP
http://lattes.cnpq.br/1566386847094104

Heber Luiz Caponi Alberti
LAPOC/CNEN
Poços de Caldas-MG
http://lattes.cnpq.br/2365344976458204

Rodrigo Leandro Bonifacio
LAPOC/CNEN
Poços de Caldas-MG
http://lattes.cnpq.br/8182447113654932

Ricardo Perobelli Borba
Instituto de Geociências / Unicamp
Campinas-SP
http://lattes.cnpq.br/1543462300385756

RESUMO: A pesquisa de materiais alternativos ao tratamento da drenagem ácida de mina (DAM), seja para a neutralização da acidez ou para a remoção de elementos potencialmente tóxicos tem sido realizada tanto na busca de redução de custos, aumento de eficiência ou reciclagem de materiais. Nesse contexto neste trabalho foram testados biocarvões de casca de eucalipto (BCEuc) e de bagaço de cana (BCCana) no tratamento da DAM da mina de Urânio Osamu Utsumi (MOU). Os testes foram realizados em laboratório por meio da percolação da DAM em colunas contendo os biocarvões. Os biocarvões foram analisados por difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise imediata, espectroscopia no infravermelho (FTIR) e digestão parcial das cinzas pelo método USEPA 3051. As soluções dos experimentos foram analisadas por espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) e espectrometria de massa com fonte de plasma (ICP-MS). As massas de biocarvões necessárias para a neutralização do pH da DAM de pH=3,77 a pH=5 pelos biocarvões foi ~27.7 kg BCEuc/m^3 DAM e de ~50kg BCCana/m^3 DAM. Houve a retenção total de Th, e parcial de As, U da DAM. Foram identificados precipitados de terras raras nos biocarvões após as percolações. Se a capacidade de neutralização é pequena, a retenção total do Th, e parcial do U e As indicam um potencial do uso dos biocarvões para a remoção destes íons de soluções.

PALAVRAS-CHAVE: biocarvão; remediação; drenagem ácida de mina, urânio, terras raras

REMEDIATION OF MINE ACID DRAINAGE FROM THE OSAMU UTSUMI URANIUM MINE (MG) WITH BIOCHARS IN A PERMEABLE REACTIVE BARRIER IN THE LABORATORY

ABSTRACT*:* The search for alternative materials to the treatment of acid mine drainage (AMD), either for the neutralization of acidity or for the removal of potentially toxic elements, has been carried out in the search for cost reduction, increased efficiency or material recycling. In this context, in this work, biochars from eucalyptus bark (BCEuc) and sugarcane bagasse (BCCana) were tested in the treatment of AMD at the Osamu Utsumi Uranium mine (MOU). The tests were carried out in the laboratory by percolating the AMD in columns containing the biochars. The biochars were analyzed by XRD, SEM, immediate analysis, infrared spectroscopy (FTIR) and partial ash digestion by the USEPA 3051 method. The experimental solutions were analyzed by inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The mass of biochars required for neutralizing the pH of the AMD from pH=3.77 to pH=5 by the biochars was ~41 kg BCEuc/m^3 AMD and ~83kg BCCana/m^3 AMD or BCCana. There was total retention of Th, and partial retention of As, U and rare earths from AMD. Rare earth precipitates have been identified in biochars after percolation. If the neutralizing capacity is small, the retention of total Th, and partial retention of U and As indicate a potential for using biochars to remove these ions from solutions.

KEYWORDS: biochar, remediation, acid mine drainage, uranium, rare earth elements

INTRODUÇÃO

A mina de Osamu Utsumi (MOU) ocorre em rochas vulcânicas do Complexo Alcalino de Poços de Caldas na região de Caldas. Estas rochas estão mineralizadas em U, Mo, Yh, Th e terras raras (Holmes et al., 1992 e Fraenkel et al., 1985). O Complexo Alcalino de Poços de Caldas possui rochas intrusivas, nefelina-sienitos, e extrusivas, tinguaítos e fonólitos. Processos hidrotermais promoveram a formação dos depósitos minerais nestas rochas. No complexo são encontradas rochas com altos teores de Ti, minerais de Mo, zirconita, pirita e fluorita (Fraenkel et al., 1985).

Na jazida da MOU o U ocorre como uraninita [UO_2] e coffinita [$U(SiO_4)^{1-}{}_x(OH)4_x$]. Além destes minerais ocorrem nas rochas mineralizadas galena (PbS), esfalerita (ZnS), pirita (FeS_2), fluorita (CaF_2), jordisita (MoS_2), baddeleíta (ZrO_2) e zirconita ($ZrSiO_4$) (Oliveira (1974) apud Tedeschi (2005)).

A exploração de U na MOU (Fig. 1) ocorreu entre os anos 1982 e 1995. A extração e beneficiamento do minério levou a geração de passivos ambientais, dentre os que persistem até os dias de hoje, destacando-se a geração da drenagem ácida a partir de pilhas de estéril (Fig. 2). A contaminação de drenagens e águas subterrâneas é o maior risco associado a esse passivo, que pode atingir a população do entorno (Alberti, 2017).

Figura 1. Vista Geral da Mina Osamu Utsumi e sua cava inundada. (Extraído de Alberti, 2017).

A drenagem ácida de mina (DAM) da MOU é proveniente da oxidação de sulfetos presentes nas seis pilhas de estéril, que totalizam cerca de 45 milhões de m^3 de material de decapagem e triagem de corpos de minério. Foram dispostos 2.395.820 ton de rejeitos contendo pirita depositados em pilhas de estéreis denominados bota-foras (BF´s). Mensalmente há a produção de cerca de 130000m^3 de DAM associados a estes BF´s. A maior dessas pilhas é o Bota Fora 4 (BF4), que ocupa 56,9 ha e contém 12,4 milhões m^3 de estéril, com altura de talude de 90 metros (Fig. 2). O BF4 produz cerca de 80000m^3/ mês de DAM (Cipriani, 2002).

Figura 2. Vista do BotaFora 4 (BF4) e da surgência da DAM na base da BF4. (Extraído de Alberti, 2017).

O tratamento da DAM da MOU é realizado por meio da adição de cal hidratada e floculante (Cipriani, 2002). Como forma de reutilização de materiais e minimização do custo do tratamento da DAM são pesquisados tanto o uso de resíduos de processos industriais como escória de fornos, lama vermelha de alumínio, cinzas de carvão (Kaksonen e Puhhaka, 2007; Fungaro e Izidoro, 2006); mineralização por injeção de CO_2 (Hassas et al., 2020) como o reuso de água e recuperação de recursos presentes na DAM (Naidu et al., 2019; Acharya e Kharel, et al., 2020). Nesse contexto o biocarvão, produto da queima de biomassa na presença de pouco ou nenhum oxigênio em um processo chamado pirólise, possui características interessantes como elevada área superficial e porosidade que permitem a esse material a capacidade de adsorção de elementos e seu possível uso como agente na remediação de drenagem ácida de mina (Lehmann e Joseph, 2009).

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi avaliar a capacidade de remediação da DAM da mina Osamu Utsami, da INB no município de Caldas (MG) em experimentos de laboratório utilizando-se os biocarvões de bagaço de cana de açúcar (BCCana) e de casca de eucalipto (BCEuc).

MATERIAIS E MÉTODOS

Testes de Percolação

Os testes de remediação da DAM da MOU foram feitos lixiviando-se a mesma em colunas no laboratório. A DAM foi percolada em 2 colunas preenchidas com BCEuc e BCCana (Fig. 3).

A B

Figura 3. Coluna preenchida com biocarvão (A). Em (B) aparato experimental com bomba peristáltica e coletor de frações.

Os biocarvões foram produzidos pelo método da pirolise rápida (2 a 4s) em ambiente controlado com temperatura de 470 a 500 ºC, pela empresa Bioware. A DAM foi coletada no BF4 da MOU.

As lixiviações foram realizadas em colunas de acrílico com volume de 55 ml (Fig. 3), diâmetro de 2 centímetros e altura de 11 centímetros. Foram utilizados 5g de cada biocarvão em cada coluna, misturados a 20g de areia. O volume de poros (Vp) das colunas foi de 21,8 mL (BCEuc) e 22,7 mL (BCCana). A DAM foi bombeada nas colunas em fluxo ascendente por 24h com uma vazão de 1mL/min. As soluções percoladas foram coletadas continuamente em tubos de centrifuga com volumes de 12 mL. O volume total de DAM percolado pelas colunas foi de 1,7L na coluna BCEuc e de 1,5L pela coluna BCCana.

As soluções coletadas foram filtradas em membrana de 0.45 μm e aciduladas com HNO3. Essas soluções foram analisadas por espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) e espectrometria de massa com fonte de plasma (ICP-MS) para o U e o Th, além de ter seus parâmetros físico-químicos determinados em alíquotas não aciduladas.

Caracterização Dos Biocarvões

Foi realizada a análise elementar CHN e análise imediata de amostras biocarvão pela Central Analítica da Unicamp.

A caracterização química dos biocarvões foi feita por meio do método 3051 da United States Environmental Protection Agency (USEPA, 1994). Neste ensaio a amostra tem uma digestão parcial, que mimetiza a extensão máxima de liberação de íons metálicos para o ambiente do material ensaiado.

Os sólidos cristalinos foram identificados por difração de raios X (DRX), antes e após os experimentos, no difratometro Bruker D2PHASER com tubo de cobre, com slit primário de 0,6mm, faca de 3mm, com corrente com 30 kV e 10 mA. O passo foi de 0,02º/s e a varredura 2Θ variando de 5º até 72º.

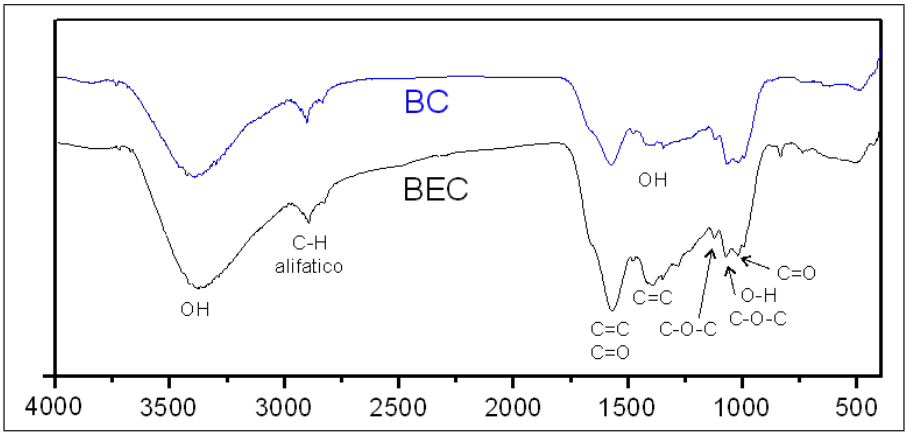
Após os experimentos os biocarvões foram examinados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no equipamento marca Leo, modelo 430. As configurações de funcionamento foram as seguintes: energia do feixe de elétrons entre 300 V e 20 kV e distância entre a amostra e o detector de 19 mm. Foram feitas análises usando um espectrômetro de energia dispersiva (EDS).

Os grupos funcionais presentes nos biocarvões foram determinados por meio de espectroscopia no infravermelho (FTIR).

RESULTADOS

Características dos biocarvões e da DAM

O BCEuc e o BCCana possuem propriedades físicas e químicas contrastantes, a saber: CTC (mmolc/kg) 445 e 313; pH 7,9 e 6,5; o teor de cinzas (% m/m) 12,4 e 26,3; respectivamente. Os compostos cristalinos com estruturas de minerais identificados por DRX no foram BCEuc o quartzo e o grafite e no BCCana o quartzo e a silvita. O exame dos biocarvões no MEV identificou apenas compostos de SiO_2 e C. Nos interferogramas do BCEuc e do BCCana foram identificados os grupos funcionais: OH, C-H, C=C, C=O, C-O-C em ambos biocarvões (Fig. 4).



Comprimento de onda (cm-1)

Figura 4 – Espectros de Infravermelho dos biocarvões BCCana (BC) e BCEuc (BEC).

A DAM da BF4 apresentou pH 3,77, condutividade elétrica=1124 μS.cm-1 e Eh=457,9 mV. Os principais íons encontrados na DAM foram Al, Ca, Mn, Zn, K, Na, As e Se (Tabela 1).

ion	Al	As	Ca	K	Mg	Mn	Na	Se	SO_4	Zn	U	Th	La	Ce	Nd
($mg.L^{-1}$)	124,4	0,9	110,1	9,4	6,6	92,3	3,2	0,1	116,5	12,9	4,5	0,09	32,1	23,5	8,1

Tabela 1: Características físico-químicas e Composição química das amostras de drenagem ácida de mina da Mina Osamu Utsami – INB Caldas (MG)

Os principais íons solubilizados nos biocarvões após a aplicação do método EPA-3051a foram para o BCCana: K, Fe, Ca, Al, P e S e para o BCEuc: K, Fe, Ca, Al, Mg, P e S (Tabela 2). Com relação aos elementos traço os valores mais elevados encontrados no BCCana foram de Na, Mn, Ba, Zn, Pb, Cr e Cu já BCEuc o Na, Mn, Ba, Zn, Cr, Fe, B e Cu foram os principais traços encontrados.

	mg.kg^{-1}		mg.kg^{-1}	
	BCCana		BCEuc	
Elemento	Média	σ (n=3)	Média	σ (n=3)
Al	4301,7	721,5	367,5	8,9
As	1,3	1,8	4,3	1,1
Ba	128,4	5,0	64,6	3,7
Ca	4477,2	230,8	6446,2	284,5
Pb	28,3	1,3	7,4	0,1
Cu	11,1	0,2	10,3	0,1
Cr	17,3	4,1	27,4	0,1
S	915,8	66,1	814,3	0,8
Fe	4841,9	410,3	20,8	1,8
P	1524,8	50,9	2675,2	39,9
Mg	2033,5	150,7	2987,1	62,5
Mn	164,4	9,4	121,0	0,2
K	14433,9	14,0	41187,8	868,4
Na	239,0	0,0	288,3	0,1

Tabela 2 – Composição química dos biocarvões de bagaço de cana e casca de eucalipto utilizados no experimento

Experimentos de Percolação

A neutralização da acidez da DAM (pH=3,77) pelos biocarvões foi relativamente baixa, em termos de volume de solução neutralizada com pH igual a 5. O BCEuc conseguiu neutralizar cerca de 180 mL (~27,7 kg BCEuc/m^3 DAM) e o BCCana neutralizou cerca de 100 mL apenas (~50kg BCCana/m^3 DAM). Em ambos os experimentos o pH ficou estável um pouco acima do pH da DAM, em torno de 4,2 (Fig. 5A).

Com relação aos íons presentes na DAM, houve a retenção total de Th por ambos os biocarvões (0,16mg pelo BCEuc e 0,15mg pelo BCCana). Para o As, U e o Zn a capacidade de retenção do BCEuc foi superior à do BCCana (Tabela 3 e Figs. 5b, 5c e 5D). Os demais elementos (Al, Ca, K, Mg, Mn e Na) apresentaram um valor liberado superior ao que foi percolado pela DAM. Isso se deve ao fato destes elementos estarem presentes nas cinzas dos biocarvões, identificados por meio do ensaio de solubilidade das cinzas EPA3051 (Tabela 1).

	Massas	Al	As	Ca	K	Mg	Mn	Na	Zn	U
BCEuc	Adicionada DAM (mg)	208,0	1,5	151,9	17,3	11,3	114,5	6,4	22,6	7,9
	Percolada (mg)	219,2	1,3	217,1	41,2	11,3	148,7	7,8	18,4	2,9
	retida	-11,2	0,2	-65,2	-23,9	0,0	-34,2	-1,4	4,1	5,0
	% retida	-5,4	**14,5**	-43	-139	-0,4	-29,9	-22	**18,4**	**63,1**
	Cinzas (mg/kg)	367	4.3	6446	41187	2987	121	288	56	0
BCCana	Adicionada DAM (mg)	183,3	1,4	133,9	15,2	9,9	100,9	5,7	19,9	6,8
	Percolada (mg)	202,3	1,2	169,0	37,0	11,0	131,2	6,2	16,8	5,4
	retida	-19,0	0,1	-35,1	-21,8	-1,0	-30,3	-0,5	3,1	1,3
	% retida	-10,4	**10,8**	-26,2	-143	-11	-30,1	-9,5	**15,5**	**20,3**
	Cinzas (mg/Kg)	4301	1.3	4477	14433	2033	164	239	104	0

[1] Os valores negativos na tabela representam elementos que saíram em concentrações maiores do que a solução de entrada, provavelmente por estarem tanto na DAM como nos materiais reativos. [2] massa percolada = massa total contida na solução coletada da coluna. [3] massa retida = massa adicionada pela DAM - massa percolada. [4] Th = todas as medidas após o tratamento se mostraram abaixo dos limites de detecção do equipamento.

Tabela 3: Balanço de massa do tratamento da DAM pelos materiais reativos.

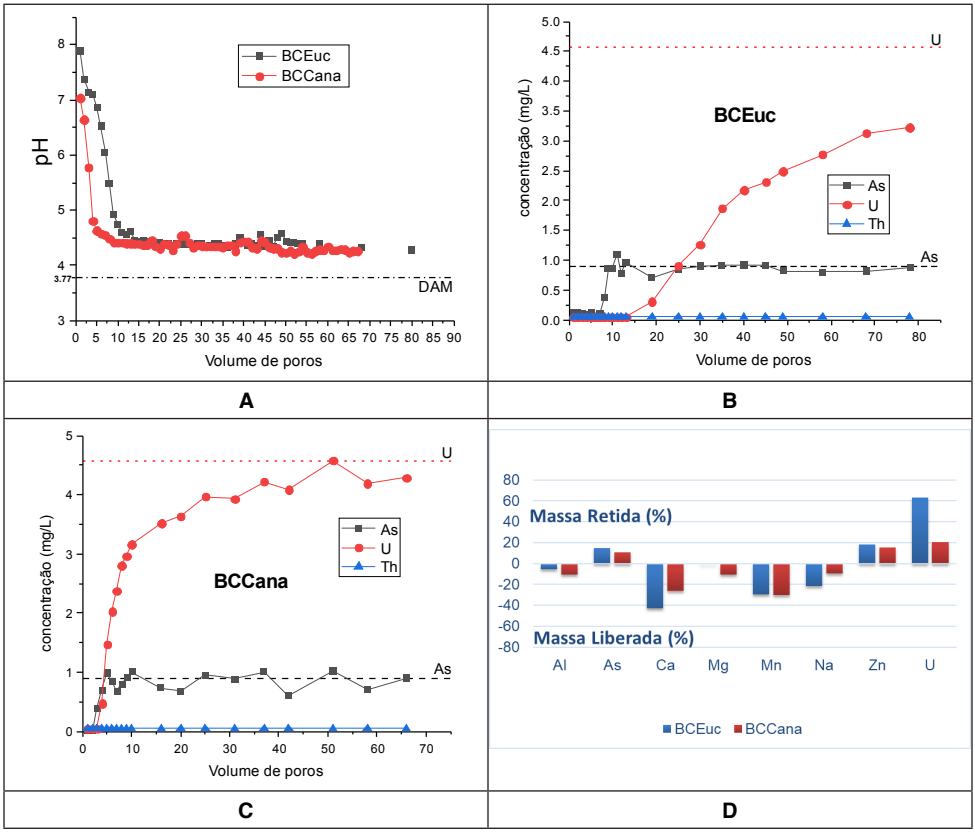
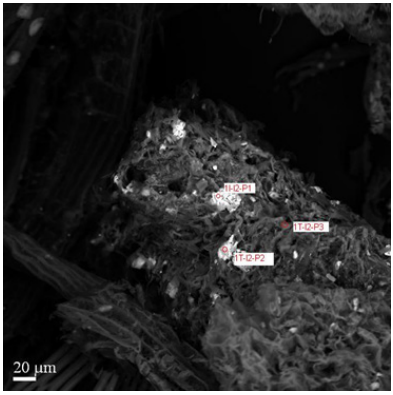


Figura 5 – Capacidades de neutralização da DAM pelos biocarvões (A) e de retenção de As, U e Th (B, C) ao longo da lixiviação. A capacidade total de retenção ou liberação é apresentada em (D).

As assinaturas dos grupos funcionais nos interferogramas de ambos biocarvões permaneceram inalteradas após a percolação, indicando não ter havido uma obliteração total destes sítios devidos `a adsorção.

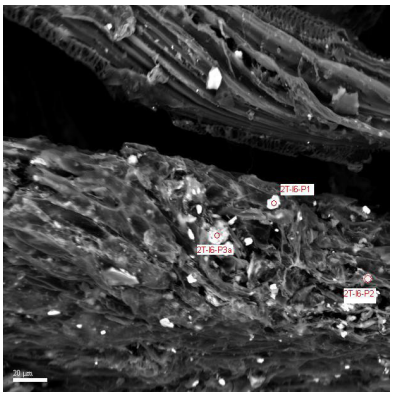
O exame por MEV dos biocarvões (Fig. 6) após os experimentos de percolação identificou diversos compostos precipitados. No BCEuc foram identificados precipitados de $CaSO_4$ com Al, K, Sr, La, e Ce; e possivelmente $BaSO_4$. No BCCana foram identificados $CaSO_4$ e um composto com C, O, P, Ce, La e Nd. Aliado à adsorção, a precipitação foi um mecanismo importante na retenção dos íons.



A

Ponto 1				Ponto 2			
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %	Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	30.58	50.50	O K	ED	23.38	46.03
Si K	ED	20.96	19.72	Na K	ED	0.35	0.47
S K	ED	19.13	15.76	Al K	ED	0.93	1.09
K K	ED	4.32	2.92	Si K	ED	0.44	0.49
Ca K	ED	13.56	8.94	S K	ED	25.02	24.58
La L	ED	6.51	1.24	K K	ED	6.98	5.62
Ce L	ED	4.95	0.93	Ca K	ED	21.02	16.52
Total		100.00	100.00	Sr L	ED	1.88	0.68
				La L	ED	11.03	2.50
				Ce L	ED	8.97	2.02
				Total		100.00	100.00

B



C

Ponto 1				Ponto 2			
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %	Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	27.60	48.02	C K	ED	35.85	47.83
O K	ED	30.92	40.38	O K	ED	42.23	42.31
P K	ED	10.01	6.75	Na K	ED	0.31	0.21
Ca K	ED	0.44	0.23	Si K	ED	0.53	0.30
La L	ED	8.28	1.24	S K	ED	9.28	4.64
Ce L	ED	16.95	2.53	K K	ED	2.36	0.97
Nd L	ED	5.81	0.84	Ca K	ED	9.07	3.63
Total		100.00	100.00	Fe K	ED	0.37	0.11
				Total		100.00	100.00

D

Figura 6 - Imagens de elétrons retroespalhados do BCEuc (A) e do BCCana (C) onde se observam estruturas vegetais preservadas, e os pontos da análise quantitativa de sólidos precipitados após o tratamento da DAM (B e D).

DISCUSSÕES

Segundo Fidel et al. (2017) a capacidade de neutralização de acidez dos biocarvões depende das cinzas (compostos inorgânicos nelas presentes, constituídos por sais de carbonatos e bicarbonatos, óxidos, hidróxidos, sulfatos e ortofosfatos sais alcalinos inorgânicos) e dos grupos funcionais de superfície. Os processos responsáveis pela neutralização da DAM envolvem tanto a protonação dos grupos funcionais de superfície como a solubilização das cinzas e liberação de bases inorgânicas. Apesar do BCCana possuir o dobro do teor de cinzas em relação ao BCEuc, o BCEuc neutralizou a acidez (pH superior a 5,5) com maior eficiência que BCCana. Nos experimentos o BCEuc neutralizou 6vp (31kg BCEuc/m^3 DAM), enquanto o BCCana foi capaz de neutralizar apenas 3vp (83kg BCCana/m^3 DAM). Esta diferença na capacidade de neutralização pode ser explicada pela CTC e o pH em água, que no BCEuc são superiores ao do BCCana. Além disto, a disponibilidade dos grupos funcionais no BCEuc é maior que no BCCana, conforme pode ser observado nos interferogramas (Figura 4), em virtude da maior absorbância dos grupos funcionais semelhantes em ambos biocarvões (Schrader, 2008).

Numa comparação direta com métodos de tratamento da acidez das DAM´s, os biocarvões apresentaram baixa eficiência. Os tratamentos usuais (Li et al., 2018) são feitos com adições na DAM de compostos alcalinizantes, como a calcita ou Ca(OH)2 (cal hidratada). Para a neutralização de água ácida de um rio, inicialmente com pH 3.7, para pH 5.0 Kapil e Bhattacharyya (2017) utilizaram individualmente diferentes reagentes: (i) 10g CaO/ m^3, (ii) 13g CaCO3/m^3, (iii) 20g de NaCO3/m^3 e (iv) 14g de NaOH/m^3. Esses valores são entre 150 a 300 vezes inferiores ao da quantidade necessária do BCEuc, o que evidência que a neutralização da DAM não é a principal vocação do BCCana e BCEuc na remediação.

Dentre os íons de maior interesse, As, Mn, Zn e U, foram observados diferentes níveis de remoçãoem função do elemento: U>Zn>As; com o BCEuc apresentando uma retenção superior ao BCCana (Fig. 5D). A retenção de íons nos biocarvões pode se dar por (i) troca iônica, atração eletrostática, (ii) complexação de superfície e (iii) formação de complexos de esfera interna nos grupos funcionais de superfície (Tan et al., 2015). Além disto existe a possibilidade de ocorrer na superfície dos biocarvões a adsorção física, a co-precipitação e precipitação de superfície (Figura 7).

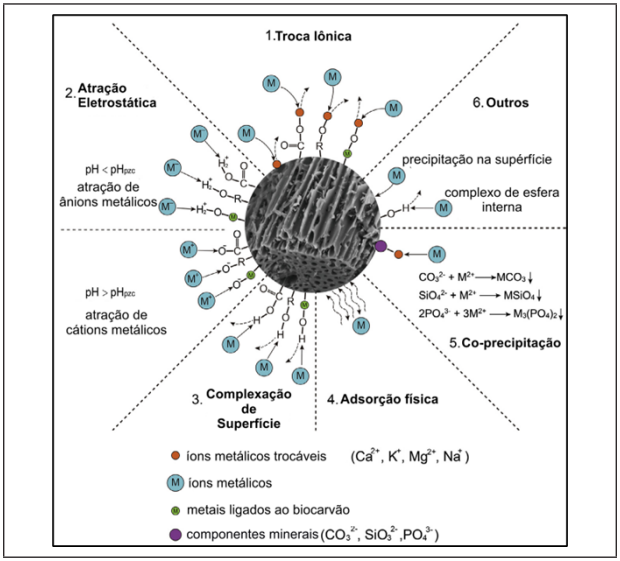


Figura 7 - Mecanismos de adsorção de metais no biocarvão. Modificado de Tan et al (2015).

Como nos biocarvões após a lixiviação, foram detectados pelo DRX e pelo MEV apenas cristais com a estrutura do quartzo e precipitados com a composição da gipsita (CaSO4.nH2O) “puro” ou contendo La, Ce, Nd Ca, é provável que o As, U e Th tenham sido adsorvidos em suas superfícies.

CONCLUSÕES

Embora os biocarvões não tenham sido eficientes na neutralização da acidez da DAM, eles apresentaram potencial para a retenção por adsorção de As, U, Th, e precipitação e recuperação dos terras raras (La, Ce e Nd) presentes na DAM, devido à elevação do pH e liberação de íons a partir da solubilização das cinzas. O BCEuc apresentou a maior eficiência nesse processo.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela FAPESP (Proc. 12/02918-5).

REFERÊNCIAS

Acharya, Bharat Sharma, and Gehendra Kharel. 2020. **Acid mine drainage from coal mining in the United States–An overview**. *Journal of Hydrology* 588 : 125061.

Alberti, H.L.C. 2017. **Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas impactadas pela drenagem ácida da mina de urânio - Osamu Utsumi, planalto de Poços de Caldas (MG)**. Tese de Doutorado em Geociências – Administração e Politica de Recursos Minerais, Universidade Estadual de Campinas, 198 p.

Cipriani, M. 2002. **Mitigação dos Impactos Sociais e ambientais Decorrentes do Fechamento Definitivo de Minas de Urânio**. Tese de Doutorado em Geociências – Administração e Politica de Recursos Minerais – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, SP.

Fidel, R.B., Laird, D.A., Thompson, M.L. and Lawrinenko, M., 2017. **Characterization and quantification of biochar alkalinity**. Chemosphere, 167: 367-373.

Fraenkel, M. O., Santos, R. C., Loureiro, F. E. V. P., Muniz, W. S. 1985. **Jazida de urânio no planalto de Poços de Caldas, Minas Gerais**. Em: DNPM. Principais depósitos minerais do Brasil – Recursos Minerais Energéticos. Brasília -DF: 1: 89-103.

Fungaro, D., Izidoro, J. 2006. **Remediação de drenagem ácida de mina usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas leves de carvão**. Química Nova, 29(4): 735-740.

Hassas, Behzad Vaziri, Mohammad Rezaee, and Sarma V. Pisupati. **Precipitation of rare earth elements from acid mine drainage by CO2 mineralization process**. *Chemical Engineering Journal* 399 (2020): 125716.

Holmes D. C., Pitty A.E., Noy D.J. 1992. **Geomorphological and hydrogeological features of the Poços de Caldas caldera analogue study sites**. Journal of Geochemical Exploration, 45: 215-247.

Kaksonen, A. H., and J. A. Puhakka. **Sulfate reduction based bioprocesses for the treatment of acid mine drainage and the recovery of metals**. Engineering in Life Sciences 7.6 (2007): 541-564.

Kaksonen, A.H., Puhakka, J.A. 2007. **Sulfate reduction based bioprocesses for the treatment of acid mine drainage and the recovery of metals**. Engineering in life sciences. 6: 541-564.

Kapil, N., Bhattacharyya, K.G., 2017. **A comparison of neutralization efficiency of chemicals with respect to acidic Kopili River water**. Applied Water Science, 7:2209-2214.

Lehmann, J e Joseph, S. 2009. **Biochar for environmental management: science and technology**. Londres: Earthscan, 415 p.

Li, Y., Li, W., Xiao, Q., Song, S., Liu, Y. and Naidu, R., 2018. **Acid mine drainage remediation strategies: A review on migration and source controls**. Minerals & Metallurgical Processing, 35: 148-158.

Naidu, Gayathri, et al. **A critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage**. Environmental pollution 247 (2019): 1110-1124.

Schrader, B. ed., 2008. **Infrared and Raman spectroscopy: methods and applications**. John Wiley & Sons.

Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., Yang, Z. 2015. **Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions**. Chemosphere, 125, 70-85.

Tedeschi, L.R. 2005. **Hidrogeoquímica e hidrologia do reservatório na cava da mina Osamu Utsumi do Complexo Mineiro – Industrial do Planalto de Poços de Caldas, Caldas, MG**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG.

USEPA. **Method 3051, microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods** (third ed.) (1994) U.S

CAPÍTULO 7

A TECNOLOGIA BLOCKCHAIN COMO VIA DE FACILITAÇÃO DAS EXPORTAÇÕES

Data de aceite: 01/04/2024

Daiane Rodrigues dos Santos

RESUMO: A importância das tecnologias disruptivas no aprimoramento e eficiência do comércio internacional será um fator de destaque nas próximas décadas, e a tecnologia blockchain emerge como uma das mais promissoras neste contexto. O artigo versou sobre o papel da tecnologia blockchain nas operações de exportação e destaca sua capacidade de reconfigurar os paradigmas operacionais convencionais promovendo confiabilidade, eficiência e transparência. O estudo abrange a análise dos impactos benéficos do blockchain, especialmente em termos de rastreabilidade, implementação de contratos inteligentes, otimização de custos e eliminação de intermediários, enfatizando os benefícios substanciais para empresas, entidades governamentais e consumidores em uma economia global cada vez mais interconectada. Examinou-se o papel das principais corporações, como a Microsoft e a IBM, que oferecem Blockchain como serviço (BaaS), facilitando a digitalização do fluxo de trabalho das empresas por meio de plataformas seguras e transparentes. A pesquisa destacou também a necessidade de uma abordagem estratégica para superar os obstáculos culturais, regulamentares e operacionais na internacionalização das empresas por meio do blockchain. A implementação de contratos inteligentes e a importância da análise criteriosa dos custos associados à sua adoção também é um tema inerente ao presente estudo. O estudo conclui que a tecnologia blockchain detém um potencial significativo, promovendo uma evolução paradigmática no domínio empresarial, particularmente nas operações de exportação, e fomenta a cooperação na cadeia de suprimentos, configurando-se como uma inovação para o comércio internacional.

PALAVRAS-CHAVE: Exportação, Blockchain, Comércio, Tecnologia disruptiva.

INTRODUÇÃO

A ascendência da tecnologia blockchain delineia uma revolução de magnitude substancial no âmbito empresarial, apresentando inovações robustas para desafios intrincados. No domínio das exportações, o blockchain surge como agente transformador,

instigando uma reconfiguração essencial nos protocolos de gestão e transporte de produtos à escala global. Esta tecnologia, segura e descentralizada, inaugura uma nova era pautada por transparência, eficiência e confiabilidade, redefinindo os paradigmas operacionais tradicionais. Aprimoramentos na rastreabilidade, implementação de contratos autômatos, otimização de custos e a supressão de intermediários consolidam o blockchain como uma ferramenta facilitadora de magnitude expressiva nas operações de exportação. Este escrito empreenderá uma análise detalhada dos impactos benéficos do blockchain na simplificação de transações, enfatizando seus benefícios substanciais para empresas, entidades governamentais e consumidores, inseridos em uma economia crescentemente interligada.

O Blockchain está em evidência na última década, com a Microsoft e a IBM oferecendo Blockchain como serviço (BaaS). O blockchain da IBM capacita as empresas a construírem redes blockchain seguras, digitalizando o fluxo de trabalho por meio de uma plataforma segura e transparente. O Microsoft Azure oferece BaaS para permitir que as organizações colaborem e desenvolvam, testem e implantem aplicativos blockchain.

O presente artigo aborda a tecnologia blockchain, cujo papel transcende a mera simplificação de transações, estendendo-se a uma instância fundamental de reforço da integridade da cadeia de suprimentos global. Este estudo visa investigar minuciosamente os efeitos positivos que o blockchain incita na facilitação das exportações, ressaltando seus benefícios imperativos para atores chave, a saber, empresas, entidades governamentais e consumidores, em um contexto econômico caracterizado por uma crescente interconexão.

A tecnologia blockchain pode oferecer várias vantagens para empresas que buscam internacionalizar suas operações, elevar, ou intensificar, o volume das exportações, a penetração em novos mercados, a consolidação em mercados já explorados. De acordo com Ganne (2018), as tecnologias de informação e comunicação revolucionaram a produção, a digitalização das transações comerciais ainda enfrenta obstáculos, principalmente devido à dependência do papel em procedimentos de comércio. A tecnologia em questão tem um potencial transformador, e é crescente a adoção da tecnologia em comércio internacional. Para o autor a blockchain pode impactar desde o financiamento comercial até os procedimentos aduaneiros e a propriedade intelectual. A natureza transparente, descentralizada e imutável da blockchain despertou o interesse de entidades privadas - e governos - para explorar o potencial dessa tecnologia no aprimoramento da eficiência dos processos comerciais. Com ela é possível tornar as transações Internacionais mais rápidas e eficientes, por exemplo. Pois permite simplificar e acelerar o processo de transações internacionais, eliminando intermediários e reduzindo os tempos de liquidação e consolidação de uma operação de venda e compra de mercadorias e ou serviços.

A superação de obstáculos culturais, regulamentares e operacionais na internacionalização de empresas requer uma abordagem estratégica. A empresa que deseja melhorar seu processo de internacionalização incorporando tecnologias inovadoras,

como a blockchain, deve primeiro identificar mercados-alvo, analisando demanda, regulamentos locais e concorrência. As parcerias estratégicas com empresas locais podem ser registradas como contratos inteligentes na blockchain, o que permite transparência e execução automatizada dos termos acordados.

A implementação de contratos inteligentes como uma inovação tecnológica de destaque na esfera da blockchain requer investimento financeiro e de tempo das empresas envolvidas. A estruturação desses contratos é realizada mediante a escolha criteriosa da plataforma blockchain, desenvolvimento em linguagens específicas como Solidity, compilação, e implantação após a análise meticulosa. A automação intrínseca dos contratos inteligentes, ativada por condições predefinidas, é de fato executada de forma automática após todo esse processo. Não obstante, a análise criteriosa dos custos associados, incluindo as taxas de transação e sua variação conforme a demanda na rede, proporciona uma compreensão abrangente do investimento necessário para a implementação dessas inovações. Essa exploração detalhada e embasada busca contribuir para a consolidação de conhecimentos na vanguarda da tecnologia blockchain.

Uma transformação paradigmática no domínio empresarial foi causada pela ascensão da tecnologia blockchain, que é segura, descentralizada e imutável (Dos Santos, 2023). Isso é especialmente evidente para os negócios internacionais, como por exemplo exportação e importação. Este estudo examina cuidadosamente todas as vantagens da tecnologia blockchain quando se trata de facilitar as exportações. Em particular, ele examina os aspectos essenciais de contratos inteligentes, autenticação e certificação, segurança contra fraudes, eficiência aduaneira, pagamentos internacionais, logística, gestão de estoque e fomento à cooperação na cadeia de suprimentos.

REFERENCIAL TEÓRICO

Ganne (2018) em sua publicação pela World Trade Organization, apresentou uma análise detalhada do potencial do blockchain para redefinir as operações de comércio internacional. Esta pesquisa explorou a viabilidade do blockchain em aumentar a eficácia dos procedimentos aduaneiros, fornecendo uma visão abrangente de como a integridade do dado pode ser assegurada ao longo de toda a cadeia de suprimentos. O autor versou especificamente como os registros imutáveis do blockchain podem facilitar a verificação de conformidade com as regulamentações comerciais e padrões de qualidade, um aspecto crítico para as exportações internacionais que frequentemente envolvem múltiplas jurisdições e órgãos regulatórios.

No artigo publicado em 2019, McDaniel e Norberg consideraram as utilizações potenciais da tecnologia blockchain no comércio internacional, uma esfera onde as transações transfronteiriças apresentam desafios significativos que a blockchain poderia potencialmente mitigar. Três áreas principais foram exploradas: a facilitação do

financiamento do comércio, a melhoria dos procedimentos aduaneiros e o rastreamento da procedência dos bens. Revelou-se que setores públicos e privados estão conduzindo uma gama de casos de uso nessas esferas. Instituições financeiras experimentaram a blockchain para ampliar o acesso e reduzir os custos de financiamento do comércio. A indústria de navegação, colaborando com participantes da cadeia de suprimentos e oficiais aduaneiros, investigou como um registro digital distribuído poderia facilitar o movimento transparente de mercadorias através de fronteiras e mares. Empresas e varejistas exploraram métodos para rastrear suas próprias cadeias de suprimento, fornecendo informações aos consumidores que cada vez mais exigem tais dados. Enfatizou-se que os formuladores de políticas deveriam incentivar a cooperação contínua, discussões ampliadas e ainda mais tentativas e erros.

A tecnologia blockchain, ainda em sua infância inovadora, exige adaptabilidade, interoperabilidade e um ambiente político que acolha a experimentação para que a economia dos EUA possa realizar os benefícios potenciais dessa tecnologia no cenário do comércio internacional. A investigação feita pelos autores revelou a necessidade crescente de um quadro regulatório que se adapte à natureza única da blockchain e às suas aplicações no comércio internacional, enquanto simultaneamente protege contra os riscos inerentes e promove a confiança entre os atores do mercado.

No artigo de Chang, Chen e Wu (2019), foi explorado o potencial da tecnologia blockchain no contexto do comércio internacional, com foco específico na reengenharia do processo de carta de crédito. Os autores identificaram as ineficiências inerentes aos sistemas tradicionais de comércio, dominados por processos manuais e por uma cadeia de confiança fragmentada, que frequentemente resultavam em atrasos e aumentavam os riscos de fraude e erros. Para abordar estas questões, os autores propuseram um modelo de processo de negócios baseado em blockchain, destinado a simplificar e automatizar as transações comerciais internacionais. Este modelo foi concebido para proporcionar uma governança distribuída e criar um ambiente operacional mais ágil e seguro para todos os participantes do comércio internacional, incluindo importadores, exportadores, bancos negociadores, bancos consultivos e transportadores.

A metodologia adotada no estudo de Chang, Chen e Wu (2019) envolveu uma análise orientada a objetos e o uso da Linguagem de Modelagem Unificada (UML) para a criação de diagramas de caso de uso, que detalharam as interações e os requisitos funcionais do sistema proposto. Os autores desenvolveram um protótipo de sistema baseado em blockchain que integrou contratos inteligentes para automatizar os processos de troca de documentos, fluxo de caixa e logística, fundamentais para as operações de comércio internacional. Contratos inteligentes específicos, como o contrato inteligente de comércio (TSC), o contrato inteligente de carta de crédito (LCSC) e o contrato inteligente de logística (LSC), foram projetados para substituir a documentação tradicional em papel e facilitar a execução de negócios de maneira confiável e eficiente. Este avanço permitiu a redução

de custos operacionais e a diminuição dos tempos de processamento, ao mesmo tempo em que reforçou a segurança e a transparência das transações comerciais. Contudo, o artigo em questão também reconheceu limitações e desafios remanescentes associados à implementação da tecnologia blockchain, tais como as preocupações com a privacidade, a segurança dos dados, a velocidade das transações e a escalabilidade. Chang, Chen e Wu (2019) sugeriram que pesquisas futuras deveriam focar na validação empírica do modelo proposto e na extensão da aplicação da blockchain para outros instrumentos de pagamento e canais de financiamento no comércio internacional. Além disso, apontaram para a necessidade de combinar a blockchain com outras tecnologias emergentes, como a Internet das Coisas (IoT) e a inteligência artificial (AI), para potencializar ainda mais a eficiência dos processos de comércio internacional.

A implementação da tecnologia blockchain foi investigada por Koh, Dolgui e Sarkis (2020) com uma lente específica sobre os setores de transporte e logística. O estudo revelou que a adoção da blockchain, além de suas aplicações iniciais no setor financeiro, representou uma inovação disruptiva, promovendo uma gestão de dados e processos de negócios mais eficiente e transparente. A pesquisa destacou como essa tecnologia emergente facilitou a administração de fluxos de carga e passageiros, especialmente em contextos transfronteiriços. A blockchain foi identificada como uma ferramenta potente para aumentar a transparência e a confiança entre as partes envolvidas, simplificando o cumprimento dos regulamentos aduaneiros e garantindo a autenticidade das transações de mercadorias e serviços.

Em continuidade, Koh, Dolgui e Sarkis (2020) discutiram as propriedades revolucionárias da blockchain, como sua natureza “sem confiança”, que permite transações seguras e confiáveis sem a necessidade de intermediários tradicionais. Através de protocolos meticulosos, a blockchain estabeleceu um registro autoritativo e inalterável de transações, considerado um “único registro da verdade”. Este aspecto foi de suma importância para construir confiança em sistemas de logística e transporte cada vez mais complexos. Entretanto, os autores reconheceram os desafios enfrentados pela adoção da blockchain, tais como questões de escalabilidade, integração com sistemas legados e a necessidade de adaptação gerencial em um ambiente interorganizacional. Eles concluíram que pesquisas futuras deveriam focar em desvendar como o aumento da transparência e eficiência operacional pode ser equilibrado com os riscos de perda de renda informacional para organizações que se beneficiam da assimetria de informações existente.

Belu (2020), em seu artigo examinou a tecnologia blockchain e sua aplicação nos procedimentos aduaneiros, destacando-se a sua potencialidade em revolucionar as transações comerciais internacionais. A investigação concentrou-se nos benefícios substantivos da adoção da blockchain, particularmente na agilização do despacho aduaneiro de mercadorias, na gestão de riscos aduaneiros e na verificação em tempo real de aspectos quantitativos, qualitativos e de origem das mercadorias. Foi enfatizada a forma

como a blockchain pode oferecer uma solução robusta para os desafios enfrentados pelas cadeias de suprimento globais, especialmente em tempos de crise sanitária, ao promover a rastreabilidade dos eventos e a investigação de incidentes, bem como ao assegurar a integridade da carga e a confiança das partes envolvidas no processo. A pesquisa da Mihaela Gabriela Belu abordou as dificuldades inerentes à implementação da tecnologia blockchain, como a falta de conhecimento aprofundado sobre a tecnologia entre os interessados, a insuficiência de coordenação entre os atores da indústria e a carência de capacidades internas. Estas barreiras emergiram como desafiadoras para a adoção do sistema por empresas de logística e transporte, que operam sob regulamentações complexas e variadas. Revelou-se que uma parcela minoritária dos executivos detinha uma compreensão clara da tecnologia blockchain e suas implicações, evidenciando uma necessidade premente de esclarecimento e educação sobre as vantagens e aplicabilidades da tecnologia para que esta seja escalada como uma prioridade estratégica nas empresas.

O artigo Belu (2020) postulou que a tecnologia blockchain detém a promessa de transformação das operações logísticas, ao proporcionar visibilidade total da cadeia de suprimentos e ao fomentar a eficiência no despacho aduaneiro. A blockchain foi proclamada como catalisadora para a redução de custos de transação, a eliminação da necessidade de documentos físicos e a potencialização da transparência nas operações de comércio exterior. Adicionalmente, os contratos inteligentes foram reconhecidos por sua capacidade de simplificar e agilizar transações, reduzindo a necessidade de intermediários e possibilitando a execução de pagamentos e contratos de seguro de forma autônoma. Assim, a integração da autoridade aduaneira como um nó nas redes blockchain foi sugerida como uma estratégia viável para aprimorar a análise de risco e otimizar os processos aduaneiros internacionais.

O trabalho de Wang et al. (2021) apresentou um estudo analítico sobre o papel transformador da tecnologia blockchain na logística portuária, explorando a dinâmica competitiva e cooperativa entre portos que optam por adotar ou não a inovação tecnológica. Utilizando um modelo de teoria dos jogos espacial, os autores investigam cenários em que dois portos heterogêneos competem por cargas em um *hinterland* sobreposto, considerando o impacto da tecnologia blockchain na taxa de frete, na demanda do mercado e no lucro. Os resultados do estudo sugerem que, enquanto a tecnologia blockchain tem o potencial de aumentar as taxas de frete e a diferenciação de serviços, sua aplicabilidade depende criticamente da comparação entre o custo operacional unitário e o benefício líquido unitário trazido pela tecnologia. A análise identifica situações de ganho mútuo, onde ambos os portos aplicam tecnologia tradicional, bem como três dilemas do prisioneiro relacionados à adoção da blockchain, que ocorrem quando o custo de configuração é baixo. Para superar esses dilemas, os autores propõem um mecanismo de “compartilhamento da tecnologia blockchain com compensação” (BTSC), que pode atingir ótimos de Pareto, enfatizando a colaboração horizontal como uma estratégia viável para os portos. Além disso, o

estudo avaliou a robustez dos *insights* qualitativos principais através de extensões que consideram competições múltiplas de portos, distribuição discreta dos usuários dos portos e cobertura de mercado incompleta, provando que as conclusões principais do modelo básico permanecem válidas sob várias condições. Wang et al. (2021) reconheceram que, apesar de algumas limitações inerentes ao modelo proposto e motivado pelas práticas atuais, há um vasto potencial para pesquisas futuras, especialmente no que diz respeito ao papel estratégico da tecnologia blockchain em cadeias de suprimento descentralizadas e às atitudes de aversão ao risco dos portos.

No estudo de Cao (2021), intitulado "A Novel Optimal Selection Algorithm for Agricultural Trade Export in Blockchain-Enabled Internet of Things", foi empreendida uma análise profunda da estrutura de exportação de produtos agrícolas. A pesquisa destacou as características distintas da estrutura de comércio, incluindo a composição das commodities, a distribuição regional, e a orientação do mercado, além das tendências de gestão das exportações. Identificou-se que as exportações agrícolas da China são predominantemente de produtos intensivos em mão-de-obra e estão geograficamente concentradas nas províncias orientais, refletindo as vantagens comparativas e a dotação de recursos agrícolas do país. Estruturas de mercado concentradas e mudanças nos agentes de exportação também foram observadas, indicando um deslocamento do monopólio estatal para um mercado mais diversificado e orientado pela participação de empresas privadas e com investimento estrangeiro.

O ponto central da pesquisa de Cao (2012) foi a criação de um algoritmo de seleção ótima que integra as tecnologias de blockchain e Internet das Coisas (IoT) no comércio de exportação agrícola. Este algoritmo visava a otimização do modo de exportação, através do qual se pretendia aumentar tanto o volume quanto o valor total das exportações de produtos agrícolas. A metodologia avançada utilizou técnicas de modelagem de elementos finitos, análises de sensibilidade e otimização de primeira ordem no software ANSYS para chegar a uma solução eficaz. Foi proposto pelo autor que a diversificação do mercado, juntamente com a consolidação de bases industriais e de processamento profundo, poderia produzir produtos agrícolas distintos com vantagens competitivas para a exportação, enfatizando a importância do desenvolvimento de marcas próprias pelas empresas de exportação agrícola e a gestão aprimorada de qualidade e segurança. Os resultados experimentais do estudo de Cao confirmaram a eficácia do algoritmo proposto, demonstrando um aumento substancial tanto no volume de exportações quanto no valor total da exportação de produtos agrícolas. O algoritmo provou ser uma ferramenta poderosa na melhora da performance do comércio de exportação, validando a premissa de que a aplicação de tecnologias emergentes pode revolucionar as práticas tradicionais de comércio.

A análise bibliométrica e revisão sistemática conduzida sobre as exportações e a aplicação de tecnologias disruptivas, com especial enfoque na blockchain, proporcionaram uma visão detalhada e atualizada do panorama global de pesquisa neste domínio.

Utilizando dados extraídos da base de dados Scopus, o estudo abrangeu o período de 2006 até 10 de novembro de 2023, destacando que o ano de 2023 ainda não havia concluído, e assim, os dados coletados refletiram a pesquisa disponível até essa data. A pesquisa identificou um total de 129 documentos, revelando uma média anual de aproximadamente 2,15 publicações, com um total de 3.836 referências citadas nesses trabalhos. Essa análise revelou também a existência de 377 palavras-chave distintas utilizadas pelos autores, indicando a diversidade temática dentro do campo estudado. Notavelmente, apenas 20 documentos foram identificados como tendo autoria única, sugerindo uma tendência predominante para a colaboração, com uma média de cerca de 3 coautores por documento. As palavras-chave empregadas na busca foram ("export" OR "exportation") AND ("Blockchain" OR "disruptive Technologies").

A partir dessa análise, foi possível calcular uma taxa de crescimento anual de 21,39% na publicação de documentos relacionados ao tema, evidenciando um crescente interesse acadêmico e industrial pelo impacto das tecnologias disruptivas, especialmente a blockchain, nas práticas de exportação. O estudo também destacou a média de citações por documento em 10,96, indicando o reconhecimento e a influência desses trabalhos na comunidade científica. A distribuição do tipo de documentos incluiu 54 artigos em periódicos, 14 capítulos de livros, 45 artigos de conferências, 11 revisões de conferências, 1 retratação e 4 revisões, com um total de 350 autores contribuindo para este corpo de conhecimento.

O estudo revelou uma série de tendências e padrões, refletindo a natureza dinâmica e multifacetada do campo, com o blockchain continuando a ser visto como uma ferramenta poderosa e transformadora nas práticas de exportação e no comércio internacional. Através da evolução da estrutura conceitual das palavras-chave dos autores, foi possível discernir a importância relativa dos temas ao longo do tempo.

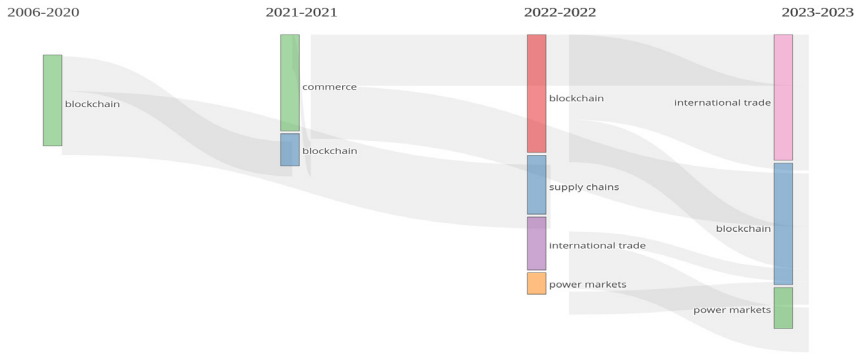


Figura 1 - Evolução Temática dos Temas Propostos Neste Estudo Fonte: Elaboração própria com base em dados coletados do Scopus utilizando o pacote Bibliometrix (R-project)

A Figura 1 apresenta a “Evolução da Estrutura Conceitual das Palavras-chave dos Autores” ao longo de quatro períodos distintos, ilustrando a dinâmica e a inter-relação entre diferentes temas no contexto de análises bibliométricas. Esta análise possibilita identificar como certos conceitos e áreas de pesquisa evoluem, ganham destaque ou interagem ao longo do tempo. Ela oferece insights essenciais sobre tendências e focos dentro de um campo específico.

No primeiro intervalo de tempo, de 2006 a 2020, o conceito de “Blockchain” é introduzido, representado por uma única barra verde, destacando o início do interesse neste tema. Avançando para o período de janeiro de 2021 a dezembro de 2021, há uma expansão temática com a adição de “Comércio”, que se torna o tema predominante, indicado por uma barra verde mais proeminente, enquanto “Blockchain” permanece relevante, evidenciado por uma barra azul menor, sugerindo uma evolução e diversificação de interesse.

No terceiro segmento, de janeiro de 2022 a dezembro de 2022, a complexidade aumenta com a introdução de novos temas: “Cadeias de Suprimentos” e “Comércio Internacional”, representados por barras vermelhas e roxas, respectivamente, ambos conectados ao conceito original de “Blockchain”, indicando interdependência temática. Além disso, “Mercados de Energia” surge como um novo tópico, ilustrado por uma barra laranja, embora não esteja diretamente conectado aos temas anteriores, sugerindo o surgimento de novas áreas de interesse. Finalmente, o último corte, de janeiro a dezembro de 2023, destaca “Comércio Internacional” como o tema mais proeminente, seguido por “Blockchain”, ambos demonstrando uma conexão contínua e evolutiva com temas anteriores, como “Comércio”. “Mercados de Energia” também reaparece, indicando persistência e possível expansão deste tema dentro do campo de estudo.

BLOCKCHAIN E SEU VASTO POTENCIAL DE USO

O blockchain, como o próprio nome sugere, é uma cadeia de blocos, e esta corrente é formada e presa como uma aplicação de criptografia. O blockchain é uma forma de registrar e compartilhar dados. Pode ser visto como um tipo específico de tecnologia de razão distribuída (“DLT”). O Blockchain é um “livro-razão” criptografado digital descentralizado usado para registrar diversas transações. Os princípios subjacentes a esta tecnologia permitem que usuários que não se conhecem ou não confiam uns nos outros construam um grande registro digital que contém informações como: “quem possui o que” (Dos Santos, 2023).

Blockchain é um sistema de autenticação que permite o registro de compra e venda (propriedade) de moedas virtuais como Bitcoin, Ethereum e Ripple. Espera-se, portanto, que os livros-razão distribuídos na forma de blockchain se tornem uma tecnologia que mudará e revolucionará o mundo dos negócios como o conhecemos. Essa tecnologia não apenas permite registros de propriedade de criptomoedas, mas também permite a

execução de diversos tipos de aplicativos, plataformas e sistemas de armazenamento e distribuição de informações. No nível governamental, o blockchain pode ser usado para monitorar e controlar determinadas tarefas, como sistemas eleitorais, arrecadação de impostos, emissão de passaportes, registro de propriedades, concessão de concessões e outros serviços.

Em Cadeia de Suprimentos (Supply Chain), por exemplo, os setores de logística e manufatura tendem a implementar conceitos descentralizados (princípio da blockchain) para rastreamento de mercadorias e contêineres de transporte, por exemplo. Impulsionado pela demanda por maior transparência na cadeia de suprimentos (rastreabilidade do início ao fim) soluções técnicas abrangentes são imprescindíveis. Blockchain ou conceitos derivados inclinam-se no fornecimento de soluções para inúmeros problemas na logística. A tecnologia Blockchain pode aumentar a eficiência e a transparência da cadeia de suprimentos e positivamente todos os processos logísticos, do armazenamento à entrega e pagamento. Além do aumento da transparência e segurança alcançadas através da blockchain, é possível acelerar o fluxo físico de mercadorias (TIJAN, *et al.,* 2019).

Intimamente relacionada ao conceito de consenso descentralizado, a tecnologia blockchain possui diversos recursos e vantagens que a tornam uma inovação revolucionária no cenário tecnológico moderno. A transparência é um dos pilares desta tecnologia, possibilitada pelo acesso universal a um registo partilhado de todas as atividades, permitindo uma transparência de dados sem precedentes. A rastreabilidade proporcionada pelo registro preciso de datas e horas permite aos usuários monitorar de forma eficaz o histórico das informações, aumentando a confiabilidade das transações (Da Silva,*et al.* 2021).

A segurança inerente à descentralização do blockchain fornece proteção robusta contra-ataques cibernéticos e aumenta significativamente a proteção de dados. A eficiência também é notável, pois o blockchain elimina a necessidade de um banco de dados central, permite a remoção de intermediários e acelera a execução das transações. Contudo, a confidencialidade é um aspecto importante, uma vez que a transparência inerente à natureza descentralizada do livro-razão torna todas as atividades visíveis para todos os participantes na rede, levantando potencialmente preocupações em matéria de privacidade. Este dilema destaca a importância de uma abordagem equilibrada destinada a equilibrar os requisitos desejados de transparência e confidencialidade ao implementar a tecnologia blockchain.

A última característica destacada, a imutabilidade, significa que uma vez que uma transação ou atividade é verificada por um sistema blockchain, ela é registrada permanentemente e não está sujeita a alterações retroativas. Esta propriedade é baseada na natureza descentralizada da criptografia e do blockchain, que fornece uma camada adicional de confiança e integridade para os dados transferidos. As propriedades combinadas da tecnologia blockchain criam assim uma infraestrutura robusta, transparente e segura que redefine paradigmas em vários campos, desde finanças até logística e gestão da cadeia de abastecimento.

Como supramencionado, um dos objetivos de um blockchain é armazenar informações, o que o torna um banco de dados. Blockchains diferem de outros tipos de banco de dados apenas pela forma como armazenam dados. Embora blockchains possam ser considerados um banco de dados, um banco de dados normalmente não é um blockchain. Os bancos de dados geralmente não usam blocos assinados para armazenar os dados. O quadro 1 mostra as principais diferenças entre os mesmos.

Na era digital a maneira como armazenamos e interagimos com os dados está evoluindo. O Tabela 1 nos proporciona uma comparação detalhada entre duas tecnologias de armazenamento de dados fundamentalmente diferentes: o Blockchain e os bancos de dados tradicionais. Este quadro comparativo esclarece as distinções cruciais em termos de integridade de dados, transações, desempenho de consulta e estrutura organizacional.

	Blockchain	Bancos de dados
Integridade de dados	A estrutura do blockchain torna praticamente impossível que alguém altere os dados sem quebrar a cadeia.	Um ator mal-intencionado pode potencialmente alterar os dados se as medidas necessárias não forem tomadas.
Transações	Os dados só podem ser lidos ou adicionados ao blockchain.	Os dados podem ser criados, lidos, atualizados ou excluídos (operações CRUD).
Consultando desempenho	Os métodos de verificação para garantir a integridade dos dados podem retardar a consulta e o desempenho geral de uma blockchain.	Os bancos de dados fornecem acesso extremamente rápido aos dados.
Estrutura	Blockchains podem ser totalmente descentralizados e não depender de nenhuma autoridade central.	Os bancos de dados são gerenciados centralmente e um administrador possui e controla os dados.

Tabela 1 – Banco de dados e o Blockchain – diferenças significativas

Fonte: Elaboração própria

A tabela 1 resume as diferenças fundamentais entre o Blockchain e os bancos de dados convencionais, contrastando-os em várias dimensões críticas. No que se refere à integridade de dados, o Blockchain sobressai por sua estrutura que impede alterações retroativas sem um consenso amplo, garantindo assim uma segurança praticamente inabalável. Bancos de dados tradicionais, embora eficientes, são vulneráveis a alterações mal-intencionadas se as proteções adequadas não estiverem em vigor.

Quando se trata de transações, o Blockchain permite apenas adições e leituras, reforçando sua natureza imutável, enquanto os bancos de dados oferecem a flexibilidade das operações CRUD (criar, ler, atualizar, deletar), o que é essencial para muitas aplicações empresariais. Em termos de performance de consulta, os mecanismos de verificação do Blockchain podem retardar a recuperação dos dados em comparação com os sistemas de banco de dados tradicionais, que fornecem acesso rápido e eficiente. A estrutura descentralizada do Blockchain elimina a necessidade de uma autoridade central, promovendo um sistema democrático de dados, em contraste com a natureza centralizada dos bancos de dados, que são controlados por um administrador ou uma entidade central.

Pagamentos e liquidações internacionais:	Representaram a maior fatia de mercado (15,9%), destacando seu potencial para simplificar e tornar mais eficientes as transferências internacionais de dinheiro.
Gerenciamento de identidade:	Obteve 11,2% do mercado, evidenciando seu uso para armazenamento seguro e verificação de identidades descentralizado.
Rastreabilidade da cadeia de suprimentos:	Alcançou 9,9% do mercado, mostrando a importância do blockchain para monitorar a movimentação de bens e garantir a autenticidade de produtos.
Contratos inteligentes:	Conquistou 8,8% do mercado, demonstrando seu uso para automação segura e confiável de acordos sem necessidade de terceiros.
Gerenciamento de ativos digitais:	Representou 8,2% do mercado, indicando sua utilidade para gerenciamento de tokens, criptomoedas e outros ativos digitais.
Outros casos de uso relevantes	Registro de terras: 4,5%, Governança: 4,4% Combate à fraude: 4,3%, Microfinanças: 4,2% Saúde: 3,8%, Energia: 3,1%.

Tabela 2 - Participação de mercado da tecnologia Blockchain em todo o mundo em 2021, por caso de uso. Blockchain technology market share forecast worldwide in 2021, by use case.

Fonte: Statista (https://www.statista.com/statistics/982566/worldwide-top-use-cases-blockchain-technology-by-market-share/)

Em 2021, como pode ser visto na tabela 2, os pagamentos e liquidações internacionais são os principais casos de uso e representam 15,9% do mercado. destacando a capacidade da blockchain de tornar uma ferramenta de transferências de divisas internacionais mais simples e eficientes. Com 11,2% e 9,9%, respectivamente, o gerenciamento de identidade e a rastreabilidade da cadeia de suprimentos são as principais áreas onde a tecnologia oferece soluções para o armazenamento seguro de identidades e monitoramento da movimentação de bens. Os dados revelam a importância atual da tecnologia no processo de pagamento internacional. Destaca-se que os pagamentos e liquidações transfronteiriças tornaram-se um caso de uso popular para tecnologias blockchain, pois permitem transferências de dinheiro, ou em outras palavras, remessas, entre países. Em todo o mundo, consumidores e empresas transmitem grandes quantidades de dinheiro internacionalmente e, no passado, este processo permaneceu relativamente caro com transferências bancárias e conversão de moeda. No entanto, mais recentemente, o setor bancário tornou-se o setor dominante mundial para tecnologias blockchain, permitindo que consumidores e empresas transmitam dinheiro internacionalmente e melhorem as remessas, diminuam custos e minimizem a exposição a criptomoedas. Com os próprios bancos usando a tecnologia blockchain, eles eliminam o “intermediário”, que neste caso é a criptomoeda. Esse aumento de popularidade no processo está levando ao aumento previsto no tamanho do mercado mundial de tecnologia blockchain nos próximos anos.

De acordo com dados divulgados pelo Statista[1], em 2023, os gastos globais com soluções blockchain alcançaram a marca de US$ 16,4 bilhões, evidenciando o crescente interesse e adoção dessa tecnologia em diversos setores. previsão para os próximos anos

1. https://www.statista.com/statistics/800426/worldwide-blockchain-solutions-spending/

é ainda mais otimista: é previsto um crescimento de US$ 67,4 bilhões até 2026, o que representa um CAGR (*Compound Annual Growth Rate*) de 33,7 por cento entre 2023 e 2026. Vários fatores estão contribuindo para o aumento dos investimentos em blockchain, como a maior adoção da tecnologia por governos e empresas, a busca por soluções que ofereçam maior segurança, eficiência e transparência e o desenvolvimento contínuo de novas plataformas e aplicações baseadas em blockchain. 32% dos gastos totalizados em 2023 foram destinados aos serviços financeiros. A manufatura (20%, US$ 3,28 bilhões), o governo (14%, US$ 2,30 bilhões), a tecnologia da informação e comunicação (12%, US$ 1,97 bilhões), a saúde (8%, US$ 1,31 bilhões) e outros setores (14%, US$ 2,30 bilhões). Além disso, os investimentos são distribuídos por várias regiões. A América do Norte tem o maior investimento de US$ 7,2 bilhões, com a Europa seguida por US$ 4,8 bilhões e a Ásia-Pacífico com US$ 3,2 bilhões. A previsão até 2026 indica um aumento significativo dos gastos em todos os setores, destacando a projeção de que os serviços financeiros atinjam US$ 22,7 bilhões, seguidos de perto por manufatura, governo, tecnologia da informação e comunicação, saúde, e outros setores, refletindo a ampliação e a consolidação do uso da tecnologia blockchain em uma ampla gama de indústrias e serviços.

O outro caso de uso popular que detém uma parcela significativa do mercado de tecnologias blockchain é a linhagem e proveniência do lote, que impactou as operações comerciais de organizações especializadas em software B2B, TI e serviços de informática. Este caso de uso permite muito simplesmente a verificação da origem e autenticidade dos componentes do produto à medida que avança ao longo da cadeia de valor. Em outras palavras, atua como uma genealogia de produto. A linhagem e a procedência do lote como caso de uso auxiliam na conformidade regulatória, em recalls específicos e evitam componentes falsificados (KÖHLER, e PIZZOL, 2020)

Por meio de sua arquitetura imutável e descentralizada, o blockchain oferece rastreabilidade completa e transparente ao longo de toda a cadeia de exportação. Todas as etapas do processo de exportação são registradas em blocos interconectados, criando um registro duradouro. Essa característica vital permite que todos os membros da cadeia de suprimentos, desde o produtor até o consumidor final, obtenham informações precisas e verificáveis sobre a origem, produção, logística e distribuição dos produtos. O Quadro 1 mostra exemplos de aplicações do Blockchain e do potencial transformador da tecnologia através de estudos de caso de algumas das corporações mais proeminentes do mundo. Estes exemplos ilustram não apenas a aplicabilidade da tecnologia em diferentes setores, mas também demonstram o impacto significativo que ela pode ter na otimização de processos e na garantia de confiança e transparência para os consumidores.

Walmart:	A Walmart implementou o blockchain para rastrear a origem de produtos alimentícios. Isso permite uma resposta mais rápida em casos de recalls, ao mesmo tempo em que oferece aos consumidores informações detalhadas sobre a procedência dos produtos2. O Walmart liderou a adoção da tecnologia blockchain para melhorar a rastreabilidade de sua complexa cadeia de suprimentos. O projeto, iniciado em 2016 com a IBM, resultou em uma redução substancial no tempo de rastreamento de produtos. Um exemplo disso foi o caso das mangas, que passou de vários dias por apenas 2,2 segundos. A introdução dessa tecnologia na China para rastrear a origem da carne suína demonstra o compromisso da empresa com a transparência. Paralelamente, em 2017, grandes players da indústria estabeleceram alianças estratégicas que resultaram no rastreamento bem-sucedido de mais de 25 produtos diversificados. O lançamento da Plataforma de Rastreabilidade Blockchain na China, em 2019, utilizando a tecnologia VeChain, assinala outro marco, assim como a bem-sucedida implementação da rastreabilidade ponta a ponta através de blockchain para exportações de camarão da Índia para os Estados Unidos. Estas iniciativas testemunham o comprometimento contínuo do Walmart com a inovação na gestão de sua cadeia de suprimentos e com as práticas de segurança alimentar.
IBM Food Trust	A plataforma Food Trust da IBM usa blockchain para rastrear alimentos desde a fabricação até o ponto de venda. Empresas de grande porte, como Carrefour e Nestlé, estão envolvidas nessa iniciativa3, (KSHETRI, 2019).
Maersk e IBM (TradeLens)	A Maersk, uma empresa do transporte marítimo, colaborou com a IBM para criar o TradeLens, uma plataforma baseada em blockchain para a indústria de transporte e logística. Ela visa aumentar a eficiência e visibilidade nas operações globais, (AHMED, & RIOS, 2022)
Everledger	A Everledger utiliza blockchain para rastrear a proveniência de diamantes e outras pedras preciosas. Isso ajuda a autenticar a origem e garantir que os produtos não sejam provenientes de fontes envolvidas em conflitos ou atividades ilegais, (Smits & Hulstijn 2020).
De Beers	A VeChain é uma plataforma blockchain que tem parcerias com várias empresas para rastrear a autenticidade e qualidade de produtos, desde alimentos até produtos de luxo, (Rios Ato & Vera Zapata, 2021).
FedEx	FedEx está explorando como o blockchain pode ser aplicado em sua cadeia de suprimentos para melhorar a visibilidade e eficiência no rastreamento de remessas, (Duarte, 2021, e Schmitz & Rule, 2019).

Quadro 1 - Utilização do blockchain para rastreabilidade e transparência.

Fonte: Elaboração própria com base em pesquisa realizada.

O Quadro 1 destaca iniciativas pioneiras de grandes empresas que adotaram o Blockchain para melhorar a rastreabilidade e eficiência em suas operações. A Walmart, como um dos maiores varejistas do mundo, empregou o Blockchain para rastrear a origem dos alimentos, reduzindo drasticamente o tempo necessário para identificar e reagir a possíveis problemas de segurança alimentar. O projeto, em colaboração com a IBM, não apenas acelerou o rastreamento de produtos como as mangas, mas também expandiu sua aplicação para outros itens, promovendo uma cadeia de suprimentos mais transparente e segura. A plataforma IBM Food Trust é outro exemplo notável, permitindo que grandes empresas alimentícias acompanhem seus produtos desde a produção até o ponto de venda final. No setor de transporte e logística, a Maersk e a IBM uniram forças para criar o TradeLens, que visa aprimorar a visibilidade operacional em escala global. A Everledger,

2 https://tech.walmart.com/content/walmart-global-tech/en_us/news/articles/blockchain-in-the-food-supply-chain.html
3 https://www.ibm.com/products/supply-chain-intelligence-suite/food-trust

por sua vez, demonstra o uso do Blockchain para garantir a autenticidade de itens de alto valor como diamantes, assegurando que eles não sejam oriundos de zonas de conflito ou atividades ilegais.

Blockchain e Contratos Inteligentes

Os Contratos inteligentes representam uma das inúmeras aplicações do blockchain, oferecendo a possibilidade de transações automatizadas e confiáveis. Esses protocolos computacionais executam as condições de um contrato automaticamente assim que os critérios predefinidos são atendidos, sem a necessidade de intermediários. Em um estudo publicado por Clack et al. (2016), os autores elucidam que contratos inteligentes não apenas codificam termos legais, mas também asseguram a execução e a aplicação desses termos, trazendo uma nova camada de eficiência ao processo de exportação. A automação de tarefas como a confirmação de recebimento de bens e a liberação de pagamentos pode agilizar significativamente as operações, cortando a verificação manual e a burocracia associada.

Ademais, contratos inteligentes têm o potencial de transformar a logística de exportação, reduzindo incertezas e fortalecendo a confiança entre as partes. Um estudo de Saberi et al. (2019) destacou que essa tecnologia pode diminuir drasticamente os tempos de espera e os erros associados à documentação em papel, que são comuns no comércio internacional. Com contratos inteligentes, a verificação de documentos e o cumprimento de regulamentos aduaneiros podem ser realizados em tempo real, permitindo que as mercadorias se movam mais rapidamente através das fronteiras. Os contratos inteligentes podem não só acelerar o processo de exportação, mas também reduz os custos operacionais, traduzindo-se em economias significativas para exportadores, tornado o bem mais competitivo no mercado internacional.

No entanto, a implementação de contratos inteligentes no comércio internacional ainda enfrenta desafios regulatórios e técnicos. A interoperabilidade entre diferentes sistemas de blockchain e a conformidade com as leis internacionais são obstáculos que precisam ser superados, como apontado por Christidis e Devetsikiotis (2016). A padronização de contratos inteligentes e o desenvolvimento de frameworks legais que os reconheçam são passos fundamentais para sua adoção em larga escala. Embora os desafios sejam reais, o potencial de simplificação e aceleração das transações comerciais torna o esforço de superá-los uma perspectiva valiosa para a economia global.

A adoção de contratos inteligentes no comércio internacional ainda está em uma fase relativamente inicial, e muitas das implementações são conduzidas em forma de projetos-piloto ou em parcerias estratégicas entre startups de tecnologia, empresas multinacionais e instituições financeiras. O quadro 2 apresenta alguns exemplos de empresas e consórcios que aplicaram contratos inteligentes no comércio internacional.

Maersk e IBM	A transportadora marítima Maersk e a IBM lançaram a TradeLens, uma plataforma de logística e comércio global baseada em blockchain que utiliza contratos inteligentes para melhorar a eficiência das operações de transporte (https://www.maersk.com).
Barclays e Wave	O banco Barclays e a startup israelense Wave realizaram o que foi relatado como a primeira transação de comércio internacional usando blockchain, que permitiu a exportação de queijo e manteiga da Irlanda para as Seychelles (Ganne, 2018).
We.trade	Uma colaboração entre vários bancos europeus, incluindo HSBC, Rabobank e Deutsche Bank, resultou na criação da plataforma we.trade. Esta plataforma usa contratos inteligentes para facilitar o financiamento do comércio e a execução de transações transfronteiriças (https://www.ibm.com/case-studies/wetrade-blockchain-fintech-trade-finance#About+we.trade+Innovation+DAC).
Commerzbank e Mercedes-Benz	O banco alemão Commerzbank testou contratos inteligentes para transações de financiamento de máquinas e equipamentos, com a Mercedes-Benz como parceira (Ganne, e Patel 2020)
Skuchain	A startup Skuchain tem parcerias com várias empresas para aplicar sua plataforma baseada em blockchain, que utiliza contratos inteligentes para otimizar a cadeia de suprimentos e o financiamento do comércio. (https://www.skuchain.com/)
Louis Dreyfus Company (LDC)	A LDC, uma das maiores comerciantes de commodities agrícolas do mundo, realizou uma transação de comércio internacional usando blockchain para uma remessa de soja dos Estados Unidos para a China, que foi apoiada por contratos inteligentes para agilizar o processo (https://www.ldc.com/press-releases/louis-dreyfus-company-ing-societe-generale-and-abn-amro-complete-the-first-agricultural-commodity-trade-through-blockchain/)

Quadro 2 - Empresas e consórcios que aplicaram contratos inteligentes no comércio internacional.

Fonte: Elaboração própria

O Quadro 2 apresenta a vanguarda da implementação de contratos inteligentes no setor de comércio internacional, destacando empresas e consórcios que tomaram a iniciativa de integrar esta tecnologia em suas operações. A colaboração entre a Maersk e a IBM, que resultou no lançamento da TradeLens, é um marco significativo, marcando um salto para a digitalização da logística do transporte marítimo. Desde o seu início em 2018, a TradeLens tem visado utilizar a transparência e segurança do blockchain para facilitar uma troca de informações mais eficiente e confiável entre os diversos atores envolvidos no comércio global. Por outro lado, a parceria entre o Barclays e a startup Wave, em 2016, sinalizou um avanço prático na aplicação da tecnologia blockchain, com a realização da primeira transação de comércio internacional documentada que utilizou contratos inteligentes para exportar produtos lácteos da Irlanda para as Seychelles, estabelecendo um precedente para futuras transações similares.

A plataforma we.trade, desenvolvida por um consórcio de bancos europeus, que desde 2018 tem proporcionado uma solução de financiamento do comércio baseada em blockchain, simplificando o processo de transações transfronteiriças e reforçando a segurança. Além disso, a parceria entre Commerzbank e Mercedes-Benz em 2020, com foco no financiamento de máquinas e equipamentos via contratos inteligentes, ilustra como as grandes corporações estão buscando eficiência por meio da inovação tecnológica. A Skuchain, com seu modelo baseado em contratos inteligentes, e a transação de soja da

Louis Dreyfus Company (LDC) em 2018, mostram o potencial disruptivo do blockchain em otimizar a cadeia de suprimentos e agilizar as operações comerciais internacionais.

A economia brasileira, já reconhecida pela sua expressiva capacidade exportadora, tem nos contratos inteligentes uma ferramenta promissora para potencializar ainda mais sua presença no mercado internacional. Com o superávit comercial observado em 2022, percebe-se que há uma demanda global crescente por produtos do Brasil, uma tendência que continuou a se manifestar em 2023. Os dados referentes às exportações brasileiras em dezembro de 2023, que alcançaram a cifra de 28.839 milhões de dólares, e o acumulado anual, com expressivos 339.673 milhões de dólares, reafirmam a posição do país como um gigante exportador. A integração de contratos inteligentes neste panorama poderia endereçar eficientemente os gargalos logísticos e burocráticos, acelerando a movimentação de produtos como soja, minério de ferro e carne, essenciais na composição da pauta exportadora e que, conforme os números de 2023, continuam em trajetória de expansão.

Ao considerar o "Custo Brasil", os contratos inteligentes emergem como uma solução inovadora capaz de mitigar os desafios econômicos internos. A adoção dessa tecnologia poderia simplificar a cadeia logística, reduzindo os custos operacionais e tributários que tanto afetam a competitividade dos produtos brasileiros no exterior. A transição para um comércio facilitado por blockchain não apenas minimizaria a burocracia, como também aumentaria a confiabilidade das transações, fatores que são decisivos para atrair investimentos e parceiros comerciais internacionais. No cenário de 2023, este avanço tecnológico representa um caminho para o Brasil superar os desafios impostos pela pandemia e se consolidar como uma economia forte, resiliente e ágil no comércio global, garantindo o aumento da competitividade dos seus produtos e a redução do "Custo Brasil", contribuindo assim para um crescimento econômico sustentável e de longo prazo.

Com contratos inteligentes, cada etapa da exportação, desde a produção até a entrega, seria automaticamente documentada em um registro imutável e acessível para todas as partes envolvidas. Este processo implementado reduziria o tempo gasto em processos de verificação manual, mitigava o risco de fraudes e erros de documentação, e pode, também, acelerar os procedimentos de inspeção e liberação aduaneira. Além disso, ao proporcionar uma maior rastreabilidade dos produtos, a tecnologia blockchain pode ajudar a garantir a qualidade e a origem dos produtos, aspectos cada vez mais valorizados pelos consumidores internacionais.

Para que o Brasil possa colher os benefícios plenos da tecnologia blockchain, é imprescindível que haja investimentos significativos, tanto do setor público quanto do privado. O investimento em infraestrutura tecnológica é crucial para criar um ambiente propício à adoção do blockchain. Isso inclui a expansão do acesso à internet de alta velocidade, a capacitação de profissionais na área de tecnologia da informação, e o desenvolvimento de plataformas e soluções adaptadas às necessidades específicas das empresas brasileiras.

Adoção da blockchain e a redução de Custos e Intermediários

No contexto do comércio exterior, a incorporação da tecnologia blockchain propicia um alicerce para a redução substancial de custos operacionais, sobretudo pela diminuição da necessidade de intermediários nas transações comerciais. A natureza descentralizada e imutável da blockchain facilita a confiança direta entre as partes, mitigando a dependência de agentes financeiros e intermediários logísticos cuja função primordial tem sido assegurar a integridade e a execução dos acordos comerciais. Nos contratos inteligentes, como supramencionado, as condições contratuais são codificadas na blockchain e executadas automaticamente quando os critérios acordados são atendidos, eliminando a exigência de garantias externas e reduzindo o campo para disputas e litígios. Consequentemente, isso não apenas condensa a cadeia de valor, mas também reflete em uma diminuição tangível das taxas de serviço e comissões que tipicamente oneram as operações de exportação.

Destaca-se que a adoção da blockchain pode ser usado para simplificar de processos administrativos e a redução de atividades manuais, que são notoriamente custosas e susceptíveis a erros. A transição para um sistema de documentação digital baseado em blockchain permite a automação de tarefas como a verificação de documentos e a conformidade regulatória, que atualmente demandam uma quantidade considerável de trabalho manual e revisão. Ao assegurar a veracidade e a integridade dos dados através de um registro auditável e à prova de alterações, a blockchain minimiza os encargos associados à auditoria e ao controle de qualidade. Este avanço pode resultar em um processo mais enxuto e eficiente, onde as economias de tempo traduzem-se diretamente em economias financeiras, fomentando uma estrutura de comércio mais ágil e menos onerosa.

De acordo com Sun, et al (2020), a adoção da tecnologia blockchain pode resultar na diminuição dos custos em múltiplas frentes dentro de uma organização. Esta redução é analisada sob o prisma da teoria dos custos de transação e da teoria da agência, que são fundamentais para compreender a economia das interações organizacionais. Os autores argumentam que a blockchain pode transformar os custos de transação e agência de maneiras significativas: A implementação de contratos inteligentes e a descentralização proporcionada pela blockchain podem reduzir o tempo de execução das transações e aumentar o volume de transações, tornando os processos mais eficientes. O estudo de Sun, et al (2020) também destaca o papel transformado dos terceiros, que se tornam cruciais na validação das transações e na redução dos custos de transação. A tecnologia de validação em maturação e os contratos inteligentes são fatores que contribuem para a diminuição dos custos associados ao papel dos intermediários tradicionais. Para os autores, Ao identificar a mudança fundamental nas estruturas de custos e formas organizacionais, os gestores podem configurar adequadamente os recursos corporativos para inovar o modelo de negócios, potencialmente reduzindo custos operacionais e administrativos.

Kfoury (2021) destaca que a blockchain é uma tecnologia revolucionária com potenciais benefícios em diversos setores, incluindo finanças, imobiliário, cadeia de suprimentos e varejo. O foco do trabalho é avaliar como a blockchain pode reduzir os custos das transações financeiras especificamente na indústria de varejo, explorando tanto o uso direto quanto indireto dessa tecnologia para alcançar eficiência em custos. A redução dos custos de transação e a agilização do tempo de liquidação são identificados como benefícios cruciais da blockchain, devido ao seu mecanismo de consenso descentralizado. A mudança para operações financeiras baseadas em blockchain pode dar autonomia às operações de back-office e diminuir custos financeiros associados à verificação da legitimidade das transações financeiras, aumentando a transparência, uma vez que todos os registros de transações ficarão disponíveis para todas as partes envolvidas. O autor estimou que a blockchain poderia reduzir o custo operacional das transações internacionais e diminuir os custos operacionais anuais das empresas e os riscos de investimento em bilhões de dólares. Além disso, a blockchain poderia gerar economias significativas em pagamentos internacionais, negociação de valores mobiliários e conformidade regulatória.

APLICAÇÕES DA BLOCKCHAIN NO CICLO DE VIDA DO COMÉRCIO EXTERIOR: UM MAPA CONCEITUAL

Na era da globalização e do comércio global em constante expansão, a integração de tecnologias avançadas tornou-se uma chave para o crescimento e a otimização dos processos comerciais. Neste contexto, apresenta-se um mapa conceitual que explora a integração da blockchain no comércio exterior e mostra como a citada tecnologia disruptiva pode redefinir as operações convencionais e aumentar a competitividade global.

A Figura 1, intitulada “Integração de Blockchain no Comércio Exterior: Um Mapa da Nova Fronteira”, apresenta um esquema estruturado que delineia algumas das possíveis aplicações da tecnologia blockchain ao longo do ciclo de vida do comércio exterior. Este mapa conceitual desdobra-se em componentes-chave, desde a produção do bem até o seguro da carga, abrangendo a rastreabilidade e procedência, negociação e assinatura de contratos, gestão de logística portuária, até a entrega final do produto. Em cada segmento do mapa é evidenciando como a blockchain pode revolucionar as operações tradicionais, conferindo maior segurança, eficiência e transparência. A saber a seção de produção do bem destaca como a blockchain assegura a origem e a qualidade dos bens através de um registro imutável, enquanto a gestão de portos e logística revela a possibilidade de otimização das operações portuárias via agendamentos coordenados e pagamentos automatizados.

A integração da tecnologia blockchain no comércio exterior representa uma inovação transformadora com potencial para redefinir as práticas convencionais de operações de cadeia de suprimentos e transações transfronteiriças. A blockchain, com seu registro

distribuído e resistente à alteração, proporciona uma fonte confiável de verificação para a procedência dos bens, permitindo que todas as partes interessadas — produtores, reguladores e consumidores — acessem informações transparentes e imutáveis sobre a jornada do produto, desde a manufatura até a entrega. Tal capacidade de rastreamento fortalece a confiança entre os participantes do mercado e otimiza o controle de qualidade e a conformidade regulatória.

Como supracitado, a aplicabilidade de contratos inteligentes (*smart contracts*) é um avanço meritório, pois possibilita a execução autônoma de acordos comerciais. Eles são programados para executar, verificar e impor a negociação ou desempenho de um contrato de maneira automática e segura. Isso resulta em uma redução substancial de discrepâncias contratuais e minimiza a necessidade de intermediários, o que diminui os custos e acelera as transações. O uso de contratos inteligentes pode ser particularmente transformador em termos de cumprimento dos termos internacionais de comércio que regem as responsabilidades dos compradores e vendedores nas entregas internacionais.

No tocante à documentação contratual, a blockchain oferece um ambiente seguro para a assinatura e o armazenamento de contratos. A tecnologia proporciona uma solução para os desafios de autenticação e validação, através do uso de assinaturas digitais que podem ser verificadas de maneira indubitável, assegurando a autenticidade e a integridade dos documentos. A inalterabilidade inerente à blockchain garante que uma vez que um contrato é assinado e registrado, ele não pode ser alterado ou contestado, o que elimina a possibilidade de falsificações e proporciona uma trilha de auditoria transparente e à prova de falhas (Figura 2).

A implementação da blockchain no campo das exportações traz um aprimoramento notável na eficiência e segurança, ao oferecer um meio de armazenamento e validação para a documentação necessária, como cartas de crédito, faturas comerciais e listas de embalagem, como pode ser visto na Figura 2. A conversão dessa documentação para um formato digital e sua consequente inserção na blockchain significa que todas as partes envolvidas têm acesso a um conjunto coerente de documentos que refletem em tempo real o estado atual das transações. Isso não apenas simplifica o processo de verificação por autoridades aduaneiras e outros órgãos reguladores, mas também acelera o processo de exportação, criando um ambiente mais ágil e econômico para o comércio global.

Como pode ser visto na Figura 2, O mapa foi estruturado em torno de cinco fases do processo de exportação, cada uma destacando como a tecnologia blockchain pode otimizar as práticas atuais. Na Produção de Bens, fase inicial, a blockchain pode ser utilizada para garantir a rastreabilidade e a autenticidade dos produtos. A tecnologia permite a criação de um registro imutável que acompanha cada produto desde a matéria-prima até a produção final. Isso não apenas aumenta a confiança entre as partes envolvidas, mas também facilita a conformidade com as normas e regulamentos internacionais, essenciais para a exportação. Pode também ser usado na certificação de Qualidade: Certificados de qualidade e inspeções podem ser registrados na blockchain, proporcionando credibilidade imutável.

Na etapa de negociação de Bens, Seguro de Crédito e Carta de Crédito a tecnologia blockchain introduz transparência e segurança inéditas nas negociações de bens, especialmente no que tange ao seguro de crédito e à emissão de cartas de crédito. Através de contratos inteligentes, condições pré-estabelecidas são automaticamente cumpridas quando as partes atendem a seus requisitos, simplificando e agilizando o processo de negociação e financiamento. Outra aplicação possível é a validação de Partes, a blockchain pode ser utilizada para a verificação de identidade e credenciais das partes envolvidas. Os contratos elaborados ao lingo do processo podem ser assinados digitalmente e armazenados na blockchain, garantindo integridade e imutabilidade das informações. A própria rede garantiria a integridade e reputação, quando houvesse, sem a necessidade de um cartório para validação e registro. Por exemplo, na solicitação da Carta de Crédito: O comprador (importador) solicita a emissão de uma carta de crédito ao seu banco, fornecendo detalhes da transação, incluindo informações sobre o vendedor (exportador), o valor da transação e os documentos necessários para a liberação do pagamento. Esta solicitação é registrada na blockchain, criando um contrato inteligente. O banco do comprador analisa a solicitação e, uma vez aprovada, emite a carta de crédito. A emissão é realizada por meio da blockchain, onde o contrato inteligente é atualizado para refletir a emissão e os termos específicos da carta de crédito. O banco do vendedor é notificado automaticamente sobre a emissão através da blockchain. O vendedor, por sua vez, ao ser notificado pelo seu banco sobre a carta de crédito, revisa os termos e, se concordar, inicia o processo de embarque da mercadoria. A aceitação do vendedor é também registrada na blockchain, garantindo que todas as partes tenham visibilidade e concordância com os termos. Na fase de embarque e documentação, o vendedor providencia todos os documentos exigidos pela carta de crédito, como por exemplo, a fatura comercial e o conhecimento de embarque. Estes documentos são digitalizados e carregados na blockchain, tornando-os acessíveis ao banco do comprador para verificação. Após essa etapa, há então a verificação e Liberação do Pagamento: O banco do comprador verifica automaticamente os documentos contra os termos estabelecidos na carta de crédito utilizando a blockchain. Se os documentos estiverem em conformidade, o contrato inteligente executa a liberação do pagamento ao vendedor. A liquidação do pagamento é feita diretamente na blockchain, transferindo os fundos da conta do comprador para a conta do vendedor. Uma vez que o pagamento é recebido, o contrato inteligente na blockchain é atualizado para refletir a conclusão da transação. Isso serve como uma confirmação final e imutável de que a transação foi concluída satisfatoriamente, de acordo com os termos acordados.

Na etapa de Embarque de Bens e Seguro de Carga: A tecnologia blockchain pode proporcionar uma maneira eficiente de registrar e monitorar o embarque de bens, garantindo que todas as partes tenham acesso a informações atualizadas sobre a localização e o estado dos produtos. Além disso, a integração de contratos inteligentes pode automatizar a ativação de seguros de carga, oferecendo proteção imediata contra possíveis danos ou

perdas durante o transporte. Na gestão de Portos e Logística, a blockchain pode contribuir na gestão portuária e a logística, oferecendo soluções para o rastreamento de contêineres, a autenticação de documentos e a simplificação dos procedimentos de alfândega. Isso resulta em uma redução significativa dos tempos de espera nos portos e uma maior eficiência logística.

Figura 2 – Integração de Blockchain no Comércio Exterior: Um Mapa da Nova Fronteira

Fonte: Elaboração própria

CONCLUSÃO

A tecnologia blockchain apresenta um paradigma revolucionário para o comércio exterior, cuja adoção poderá resultar em uma evolução significativa na maneira como as transações internacionais são estruturadas e executadas. A integração da tecnologia blockchain ao comércio exterior emerge como um paradigma disruptivo, prenunciando uma remodelação das operações tradicionais e impulsionando a competitividade no cenário

global. A presente pesquisa teve como objetivo versar sobre o potencial transformador da blockchain ao longo do ciclo de vida do comércio exterior, evidenciando sua capacidade de revolucionar práticas consolidadas e assegurar uma maior segurança, eficiência e transparência nas transações internacionais. Através do mapa conceitual, identificou-se pontos estratégicos de intervenção na qual a blockchain não apenas simplifica processos, mas também propõe soluções inovadoras para desafios históricos relacionados à rastreabilidade, negociação e gestão logística.

Com casos de uso que vão desde gerenciamento de ativos digitais até pagamentos e liquidações internacionais, o mercado de tecnologia Blockchain em 2021 mostra como o blockchain está se expandindo em várias áreas. Isso mostra o potencial que tem para mudar as coisas em várias áreas, principalmente em pagamentos internacionais, onde domina com 15,9% do mercado. O crescimento global dos gastos com soluções blockchain é projetado para atingir US$ 67,4 bilhões até 2026, refletindo o crescente interesse e adoção dessa tecnologia em várias indústrias. Isso mostra quão importante é estudar como a tecnologia disruptiva pode ser mais bem integrada em várias áreas para aumentar a eficiência, segurança e transparência.

A capacidade da blockchain de garantir a origem e a qualidade dos bens por meio de registros imutáveis é um componente essencial para a confiança e a integridade no comércio global. Esta tecnologia disruptiva fortalece as relações entre produtores, reguladores e consumidores, permitindo a criação de um ambiente onde a verificação da procedência e a conformidade regulatória são facilitadas por um sistema transparente e auditável. Este avanço representa uma mudança significativa no controle de qualidade e na eficiência da cadeia de suprimentos, o que resulta em uma redução de riscos e uma otimização do fluxo global de produtos.

Os contratos inteligentes se destacam como um avanço, oferecendo um mecanismo para a execução autônoma de acordos comerciais de maneira segura, eficiente ágil. A automatização proporcionada por esses contratos diminui discrepâncias, reduz a necessidade de intermediários e acelera as transações, resultando em economias significativas de tempo e custos. A blockchain também oferece uma solução robusta para os desafios de autenticação e validação de documentação contratual, através de assinaturas digitais verificáveis e um registro imutável. Isso garante a autenticidade e a integridade dos documentos, eliminando a possibilidade de falsificações e proporcionando uma cadeia de informações auditáveis e transparente.

Além disso, a aplicação da blockchain a documentação necessária para exportações, como faturas comerciais e cartas de crédito, é uma descoberta que muda a maneira como esses documentos são processados, verificados e armazenados. A digitalização e o registro desses documentos essenciais facilitam o processo de verificação por autoridades aduaneiras, simplificam os procedimentos de exportação e criam um ambiente de comércio mais dinâmico e menos propenso a erros e fraudes.

REFERENCES

Ahmed, W. A., & Rios, A. (2022). Digitalization of the international shipping and maritime logistics industry: A case study of TradeLens. In The digital supply chain (pp. 309-323). Elsevier.

Belu, M. G. (2020). Blockchain technology and customs procedures. Romanian Economic Journal, 23(78), 13-26.

Cao, S. (2021). A novel optimal selection algorithm for agricultural trade export in blockchain-enabled Internet of Things. Wireless Communications and Mobile Computing, 2021, 1-10.

Chang, S. E., Chen, Y. C., & Wu, T. C. (2019). Exploring blockchain technology in international trade: Business process re-engineering for letter of credit. Industrial Management & Data Systems, 119(8), 1712-1733.

Christidis, K., & Devetsikiotis, M. (2016). Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things. IEEE Access.

Clack, C. D., Bakshi, V. A., & Braine, L. (2016). Smart Contract Templates: foundations, design landscape and research directions. ArXiv.

Duarte, E. L. (2021). Segurança da informação em smart cities usando blockchain (Doctoral dissertation, Mestrado em Sistemas de Informação e Gestão do Conhecimento).

dos Santos, D. R. (2023). Finanças Digitais. Livro. Amazon.

Ganne, E. (2018). Can Blockchain revolutionize international trade? (p. 152). Geneva: World Trade Organization.

Ganne, E., & Patel, D. (2020). Blockchain & DLT in Trade: Where do we stand?. World Trade Organization.

Koha, L., Dolguiband, A., & Sarkis, J. (2020). Blockchain in transport and logistics – paradigms and transitions. International Journal of Production Research, 58(7), 2055-2058. <invalid URL removed>

Kfoury, B. (2021). The role of blockchain in reducing the cost of financial transactions in the retail industry. In CEUR Workshop Proceedings (Vol. 2889, pp. 10-22).

Köhler, S., & Pizzol, M. (2020). Technology assessment of blockchain-based technologies in the food supply chain. Journal of cleaner production, 269, 122193.

McDaniel, C. A., & Norberg, H. C. (2019). Can blockchain technology facilitate international trade?. Mercatus Research Paper.

Rios Ato, L. N., & Vera Zapata, A. L. (2021). Tecnología Blockchain y la logística internacional en el sector agrícola de Latinoamérica.

Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. International Journal of Production Research.

Schmitz, A., & Rule, C. (2019). Online dispute resolution for smart contracts. J. Disp. Resol., 103.

Smits, M., & Hulstijn, J. (2020). Blockchain applications and institutional trust. Frontiers in Blockchain, 3, 5.

Sun, RT, Garimella, A., Han, W., Chang, HL e Shaw, MJ (2020). Transformação do custo de transação e do custo de agência em uma organização e a aplicabilidade do blockchain – Um estudo de caso de seguro Peer-to-Peer. Fronteiras em Blockchain, 3 , 24.

Tijan, e.; Aksentijević, s.; Ivanić, k.; Jardas, M. Blockchain technology implementation in logistics. Sustainability, v. 11, n. 4, p. 1185, 2019

Da Silva, J. O. D., Dos Santos, D. R., Nobrega J. e Dias, F. Estudo da aplicação do blockchain

CAPÍTULO 8

ANÁLISE DO IMPACTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NA CURVA DE PATO EM UM SISTEMA ELÉTRICO E A UTILIZAÇÃO DE ARMAZENAMENTO COMO MÉTODO DE MITIGAÇÃO

Data de submissão: 08/03/2024 *Data de aceite: 01/04/2024*

Ana Beatriz Alves
Fundação Universidade Federal de Rondônia - UNIR
Porto Velho – RO
http://lattes.cnpq.br/1027947764872747

Lucas Feksa Ramos
Departamento de Eletromecânica e Sistemas de Potência (DESP)
Universidade Federal de Santa Maria
http://lattes.cnpq.br/4278790639558306

RESUMO: Os gerenciamentos de uma rede elétrica têm sofrido mudanças ao longo dos anos com o avanço dos recursos renováveis. Devido à tecnologia existente possibilitar ao consumidor possuir o controle de seu consumo de eletricidade, influenciando nas diferentes condições de operação ao necessitarem de recursos flexíveis para a confiabilidade da rede. Logo, a ISO (*Internation Organization for Standardization*) criou cenários para o futuro das curvas de carga líquida observando tais mudanças. Em uma GDFV as curvas de carga possuem variações e, a partir dessas variações denota-se um fenômeno denominado de Curva de Pato (*Duck Curve*). A Curva de Pato caracteriza-se pela queda da carga líquida (*ramp down*), durante a metade do dia, quando ocorre o pico máximo de geração de energia elétrica pelos painéis solares. Essa curva refere-se a uma exorbitante parcela de carga a ser atendida pela Geração Distribuída durante uma parte do dia, ocasionando uma queda acentuada na oferta de outras fontes do sistema elétrico e acarretando uma retomada nas horas sequentes (*ramp up*) e, assim, causam prejuízos à rede elétrica. O objetivo deste estudo é avaliar os impactos da GDFV nas curvas de carga, mais precisamente, a Curva de Pato, que impactam o sistema elétrico. Como metodologia, diversas pesquisas foram realizadas, com referenciais de artigos, teses de mestrado e doutorado e livros. Através da realização de simulações, fez-se possível realizar as comparações necessárias e indicar soluções para o problema da Curva de Pato, através da inserção de um sistema de armazenamento com baterias.

PALAVRAS-CHAVE: Geração Fotovoltaica. Curva de Pato. Baterias.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF PHOTOVOLTAIC DISTRIBUTED GENERATION ON THE DUCK CURVE IN AN ELECTRIC SYSTEM AND THE USE OF STORAGE AS A MITIGATION METHOD

ABSTRACT: The management of an electricity grid has undergone changes over the years with the advance of renewable resources. Due to the existing technology, the consumer has control of their electricity consumption, influencing the different operating conditions when they need flexible resources for the reliability of the network. Soon, the INTERNATION Organization for Standardization (ISO) created scenarios for the future of liquid load curves by observing such changes. In a GDFV the load curves have variations and, from these variations, a phenomenon called the Duck Curve is denoted. The Duck Curve is characterized by the fall of the net load (ramp down) during the middle of the day, when the maximum peak of electricity generation occurs by solar panels. This curve refers to an exorbitant portion of the load to be served by distributed generation during part of the day, causing a sharp drop in the supply of other sources of the electrical system and causing a resumption in the hot hours (ramp up) and, thus, cause damage to the electricity network. The aim of this study is to evaluate the impacts of GDFV on load curves, more precisely, the Duck Curve, which impacts the electrical system. As a methodology, several studies were carried out, with references from articles, master and doctoral theses, and books. Through simulations, it was possible to make the necessary comparatives and indicate solutions to the duck curve problem, through the insertion of a storage system with batteries.
KEYWORDS: Photovoltaic Generation. Duck Curve. Battery.

INTRODUÇÃO

A pesquisa visa avaliar os impactos da Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) nas curvas de carga de consumidores residenciais e industriais, e os aspectos que impactam o sistema elétrico de distribuição. Posteriormente, realizar uma análise comparativa entre as curvas de carga da GDFV que formam que se assemelha a silhueta de um pato, então denominada de Curva de Pato (*Duck Curve*), relativos aos picos de demanda e de produção de energia de alimentadores residenciais e indústrias e, ao final, indicar uma solução através da inserção de um sistema de armazenamento de energia com baterias com a finalidade de mitigar a curva de carga e, assim, proporcionar um equilíbrio na rede elétrica.

Dessa maneira, constatou-se a necessidade de uma análise das alterações do Sistema Elétrico de Energia em relação aos efeitos que a adoção da GDFV em larga escala pode ocasionar. Diante disso, é proposto uma alternativa de solução para estas situações que podem acarretar um grande problema às Redes Elétricas (PAIXÃO; ABAÍDE, 2021).

Ao Sistema Elétrico de Distribuição (SED) observa-se algumas mudanças conforme a entrada da Geração Distribuída Fotovoltaica, como a relação entre demanda versus produção local da energia, acarretando o excedente desta energia injetada diretamente na rede elétrica da concessionária. Devido à Geração Fotovoltaica ser dependente das condições climáticas, as quais são imprevisíveis e incertas, além de dispor de elevadas taxas

de inserção da GDFV e, dessa forma, são fatores preocupantes para as concessionárias (CALIFORNIA ISO, 2016).

A conexão da GDFV à rede ocasiona uma redução no consumo geral de energia das unidades consumidoras, onde a concessionária é responsável em efetuar uma avaliação da redução do consumo, bem como tomar decisões para manter operável à rede. Ademais, a concessionária é também responsável em avaliar as demais condições de rede que comportam a GDFV, influenciando os níveis de tensão, do fluxo de potência, carregamento de transformadores, demanda de adequações na rede, entre outros fatores. No entanto, a análise feita pelo Sistema Elétrico da Califórnia, ao qual a pesquisa em questão adotou como referência, observou que a crescente inserção da GDFV acarreta uma variação severa na curva de carga em poucas horas, em especial, ao final da tarde. A curva de carga sofre uma modificação, alterando seu formato, este que forma uma "barriga de pato", por isso, conforme dito anteriormente, a denominação de Curva de Pato (CASTRO et al., 2018).

Portanto, se faz necessário ressaltar que, ao denotar-se um caso brasileiro, tem-se que a saída da GDFV entorno do horário das 17h00min, que apresentaria uma demanda de outras fontes, como, por exemplo, a eólica e/ou hidráulica, pois, estas possuem flexibilidade e capacidade para atender a rampa de carga. Ao realizar uma análise do problema, buscou-se maneiras de amenizar a Curva de Pato de maneira que a carga não ocasione uma sobrecarga à rede elétrica e, com isso, seja mantido o equilíbrio entre geração e demanda. O Sistema de armazenamento atua em sistemas de carga e descarga, intensidade e variabilidade de duração em função da inconstância da geração de energia e dos numerosos tipos de consumo. Contudo, deve-se atentar aos ciclos diários determinados pelos perfis de geração e consumo e se impõe a um ciclo de sazonalidade que depende do avanço da radiação solar no decorrer do ano (COPETTI; MACAGNAN, 2007).

A motivação da pesquisa dá-se através do uso de bancos de baterias aos quais seriam úteis para o atendimento da rampa de carga, servindo como uma fonte de energia armazenada, pois, a participação do Brasil na geração de energia fotovoltaica ainda é baixa, conforme dados mostrados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), referente ao ano de 2018, onde este mostra que a GDFV gerou apenas 0,5% da geração de energia média, com potência média de geração de 333MW. No mesmo ano, em 2018, no último mês, o Brasil ultrapassou uma capacidade instalada em usinas fotovoltaicas de cerca de 1,1% do total (PAIXÃO; ABAÍDE, 2021) (CALIFORNIA ISO, 2016).

Sendo assim, o objetivo de resolver o problema da integração das energias renováveis, especialmente em relação à geração distribuída fotovoltaica, nos SEE (Sistema Elétrico de Energia), pois, o comportamento da produção de energia oriunda do sistema fotovoltaico ocasiona a dificuldade no ajuste da produção ao consumo, ou seja, a geração à demanda de energia, além de causar problemas do nível de estabilidade do sistema elétrico. De tal forma, devido a esse problema, é, portanto, originada a Curva de Pato e, dessa maneira, se faz necessário encontrar um método para amenizar a Curva de Pato e,

consequentemente, o problema da integração dos fotovoltaicos aos SEE e, através desse problema, surge a ideia de trazer uma maior flexibilidade ao sistema elétrico por meio da inserção de sistemas de armazenamento de energia (FERREIRA; TAVARES, 2015).

O PROBLEMA DA CURVA DE PATO (DUCK CURVE)

A relação entre as curvas de carga e as curvas de geração distribuída fotovoltaica geram picos de demanda e esses picos estão correlacionados ao problema da Curva de Pato (*Duck Curve*). Os perfis de demanda de eletricidade seguem um padrão típico relacionado as baixas que ocorrem durante a noite, um *ramp up* (rampa alta) nas primeiras horas do dia e durante o fim de tarde para a noite, um *ramp down* (rampa baixa) nas últimas horas do dia e nas primeiras horas da manhã.

Quanto mais a energia solar fotovoltaica é inserida diretamente na rede elétrica, mas ela deslocará outras fontes de geração de energia, dessa forma, ocorrerá uma interrupção na ordem de inserção de outras fontes de energia no sistema elétrico, como por exemplo, hidrelétricas. Os painéis solares produzem mais energia durante o período entre 11 e 4 horas da manhã, onde o período de irradiância solar é maior e, para cobrir o consumo de energia em residências ou indústrias, grande parte das instalações é projetada para produzir eletricidade em excesso para atender essas demandas durante esse determinado período de tempo, devido à isso, ocasiona-se a formação de uma “barriga de pato”. Além do mais, a curva de saída da geração de energia fotovoltaica apresenta um pico de energia durante uma parte do dia em decorrência da intermitência da energia produzida., ocasionando um pico duplo em questão de tempo e, dessa forma, resultando em uma curva de carga líquida.

Conforme a produção solar diminui durante o período da noite, a carga líquida sofre um aumento equivalente, logo, a geração solar é desligada e substituída por outros recursos energéticos, como por exemplo, recursos eólicos, hidrelétricos, termoelétricos, de biogás, entre outros. Durante o ciclo das 4h às 9h, ocorre um fenômeno conhecido como rampa da noite ou como visto anteriormente, *ramp up*. Essa rampa da noite refere-se ao período de maior uso de eletricidade por parte dos consumidores, gerando uma curva acentuada na demanda por energia, enquanto a quantidade de geração solar fotovoltaica disponível apresenta uma queda e, essa queda forma, graficamente, o “pescoço” do pato.

Em outras palavras, a Curva de Pato é a curva de potência total menos a curva de geração de energia fotovoltaica e, portanto, o problema da *Duck Curve* é visto graficamente, denotando o excesso de geração de energia durante o meio de um dia e a oferta insuficiente em um curto espaço de tempo. Em suma, tal problema resultará no desequilíbrio entre as fontes de alimentação e de demanda de carga, sendo assim, torna-se um perigo para a operação segura e estável do Sistema de Energia.

Debater a Curva de Pato significa atender a necessidade de se reduzir a “barriga” do pato e encurtar o “pescoço” e, para isso, encontra=se no Sistema de Armazenamento de Energia com Baterias a oportunidade de mitigar a produção de energia solar ao longo de todo o dia, acarretando mudanças no comportamento dos consumidores em detrimento da diminuição da demanda de energia durante os horários de pico. Portanto, a finalidade de se avaliar os ricos originados por esse problema, desenvolveu-se um estudo de caso, com foco em demonstrar, primeiramente, que a curva é prejudicial à rede elétrica e, segundo, apresentar uma solução de mitigação da curva para finalmente comparar, através de simulações, o comportamento do sistema a partir da inserção do sistema de armazenamento à GDFV .

ESTUDO DE CASO

A relação entre as curvas de carga e as curvas de geração distribuída fotovoltaica geram picos de demanda e esses picos estaõ correlacionados ao problema da *curva de pato (duck curve)*. Os perfis de demanda de eletricidade seguem um padrão típico ao qual estárelacionado a baixas durante a noite, um *ramp up* (uma rampa alta) nas primeiras horas do dia e durante o fim de tarde para noite, um *ramp down* (rampa baixa) nas u´ltimas horas do dia e nas primeiras horas da manhã.

Quanto mais a energia solar fotovoltaica entrar diretamente na rede elétrica, mais ela deslocará outras fontes de geração de energia, com isso, ocorreráuma interrupção na ordem de inserção de outras fontes de energia, como hidrelétricas, por exemplo, no sistema elétrico. Os painéis solares produzem mais energia durante o período entre 11 horas e as 4 horas da manha˜, quando a irradiância solar é maior e, para cobrir o consumo de energia em uma casa ou empresa, grande parte das instalações é projetada para produzir eletricidade em excesso durante essas horas, devido à isso, cria-se entaõ uma ”barriga”de pato. Sendo assim, a curva de saída da geraçaõ de energia fotovoltaica apresenta um pico de energia durante uma parte do dia devido à intermitência da energia produzida. Sua variação possui uma tendência que não é pro´pria da típica curva de carga diária, ocorrendo um pico duplo em questão de tempo e, dessa maneira, resultando em uma curva de carga líquida que se assemelha à silhueta de um pato, por tal fato, portanto, é conhecida como *Duck Curve*, ou simplesmente, *Curva de Pato*.

Conforme a produção solar diminui durante o período da noite, a carga líquida sofre um aumento equivalente. Assim, como jáfoi mencionado anteriormente, a geração solar se desliga, sendo substituída por outros recursos energéticos como eólicos, hidrelétricos, termoelétricos, de biogás, entre outros. Durante o período de 4h às 9h, ocorre um fenômeno conhecido como ”rampa da noite”, ao qual se refere ao período de maior uso de eletricidade por parte dos consumidores, gerando uma acentuação na demanda por energia, enquanto a quantidade de geração solar fotovoltaica disponível apresenta uma queda, onde esse período é referido como o ”pescoço” do pato.

Dessa maneira, tem-se que o conceito da *Duck Curve* é a de representar por meio de gráficos o problema da geração excessiva ao meio do dia e a oferta insuficiente para a rampa rápida em um curto espaço de tempo. Em suma, esse problema resultarána redução da energia fotovoltaica e no desequilíbrio entre as fontes de alimentação e de demanda de carga, sendo assim, um perigo a operação segura e estável do sistema de energia.

Debater sobre a curva de pato significa a necessidade de se reduzir a barriga do pato e encurtar o pescoço e, para isso, encontra-se no sistema de armazenamento de energia com baterias a oportunidade de amenizar a produção de energia solar ao longo de todo o dia, ocasionando mudanças no comportamento dos consumidores para diminuir a demanda durante os horários de pico.

Portanto, com a finalidade de se avaliar esse problema, desenvolveu-se um estudo de caso com foco em demonstrar que primeiro, a curva é prejudicial à rede elétrica e, segundo, seja apresentada uma solução para amenizar a curva de pato para finalmente comparar, por meio de simulações, o comportamento do sistema a partir da inserção do sistema de armazenamento.

ANÁLISE, TRATAMENTO DE DADOS E RESULTADOS

O estudo proposto foi o de realizar uma análise do impacto da geração solar fotovoltaica nas curvas de carga que geram o problema da carga líquida a qual a sua forma se assemelha com a silhueta de um pato (curva de pato).

Levou-se em consideração, dados básicos de geração de energia fotovoltaica, como a área estabelecida em metros quadrados (m^2) dos painéis solares, dados básicos de irradiância, simulando o comportamento do Sol em um dia normal, além de optar por um transformador comum, abaixador, de média tensão; bem como buscou-se balancear a rede entre o sistema de potência e a geração solar fotovoltaica. Além disso, definiram-se as características do sistema simulado para parametrizar cada bloco do circuito. Portanto, buscou-se realizar a construção da simulaçao da maneira mais simples possível para mostrar ser possível obter os resultados positivos esperados.

Inicialmente, tem-se que principal ponto desse estudo é o de analisar o impacto da geração distribuída fotovoltaica (GDFV) na curva de pato de um sistema elétrico e encontrar um método de mitigar a curva através da utilizaçao de sistemas de armazenamento de energia com baterias (SAEB).

Primeiramente, elaboraram-se diagramas de modo a mostrar de forma simples e esquemática a ligação entre o *power grid*, ou simplesmente, sistema elétrico de potência em relação aos painéis fotovoltaicos enquanto geração distribuída fotovoltaica, e as demandas de energia, sendo estas residenciais e industrias. Na Figura 1, verifica-se o diagrama para o sistema fotovoltaico conectado à rede, junto as demandas a serem atendidas e, na Figura 2, tem-se o mesmo diagrama, porém, com a inserção de um sistema de armazenamento de energia com baterias.

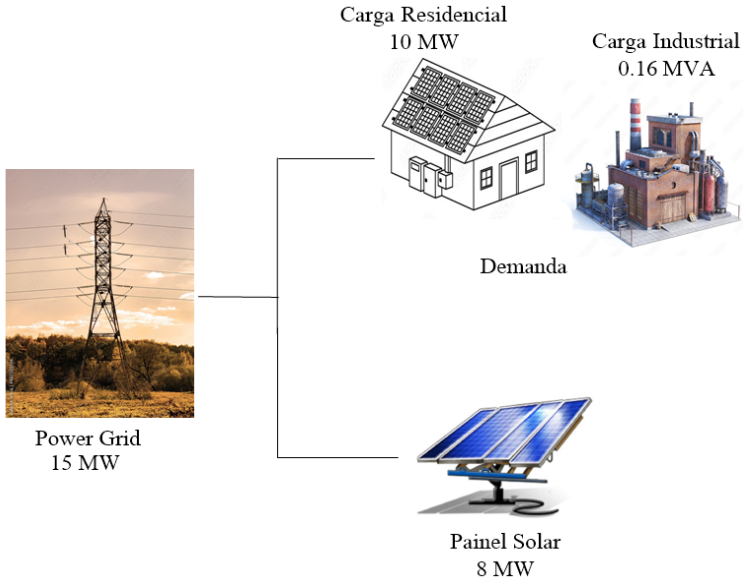


Figura 1 – Diagrama representando o Sistema de Geração Distribuída Fotovoltaica ligada à Rede Elétrica.

Fonte: Autoria própria.

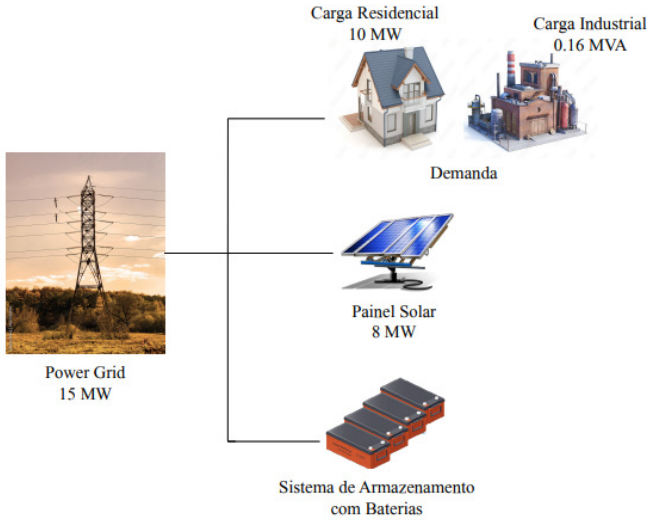


Figura 2 – Diagrama representando o Sistema de Geração Distribuída Fotovoltaica ligada à Rede Elétrica com Sistema de Armazenamento de Energia com Baterias.

Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, desenvolveu-se um circuito, conforme Figura 3, referente a um sistema de geração fotovoltaica conectado à uma rede de distribuição utilizando o *software simulink*, ao qual faz parte do *software matlab*, para simular o comportamento do sistema perante o excesso de geração de energia inserido diretamente na rede. Para o mesmo circuito, tem-se o intuito de se inserir ao sistema de geração fotovoltaica um sistema de armazenamento de energia com baterias para que esse sistema amortize a curva de pato.

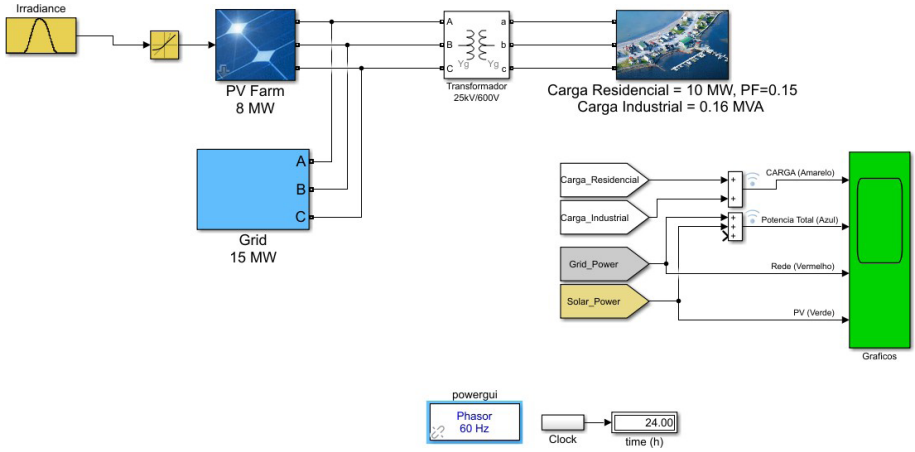


Figura 3 – Simulação do Circuito de um Sistema de Geração Distribuída Fotovoltaica conectado à Rede Elétrica.

Fonte: Autoria própria

Nas curvas de carga, tem-se o bloco do subsistema referente às cargas residenciais e industriais no sistema simulado ao qual pode ser visualizado conforme a Figura 3. A parte de cima do subsistema corresponde às cargas industriais, com a presença de uma máquina assíncrona e um motor, como também, dados da potência elétrica em kW (*kilowatt*) e de velocidade do rotor em p.u (sistema por unidade). A parte de baixo do subsistema refere-se às cargas residenciais, com ganhos de potência ativa (W) e potência reativa (MVA). No bloco do subsistema, tem-se que para a carga industrial o uso de um potencial reativo para que a *smart grid* se aproximasse de um cenário real e, para as cargas residenciais, tem-se uma carga normal.

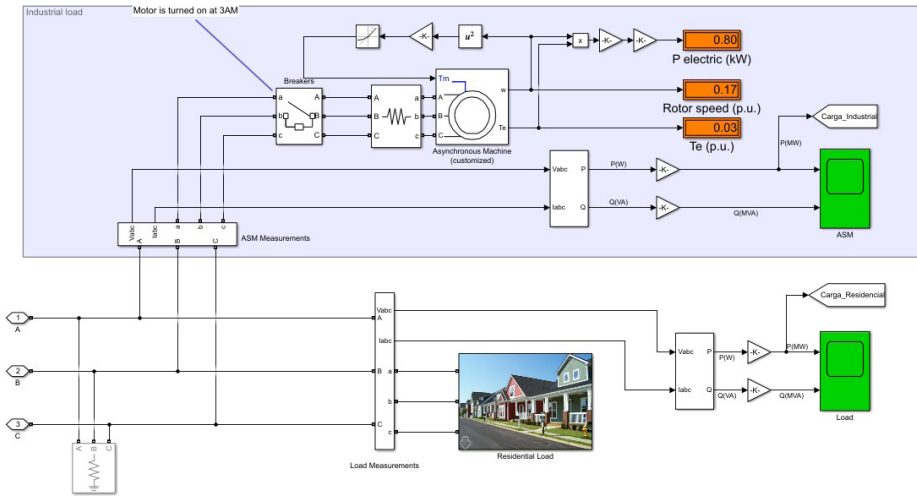


Figura 3 – Bloco do subsistema das cargas residenciais e industriais.

Fonte: Autoria própria.

Para realizar esses procedimentos, alguns pontos foram considerados, como o *clock* de tempo de 86.400 pontos de segundos, correspondente às 24h para simular um dia normal de geração de energia. Para o bloco referente ao *grid*, corresponde à rede, limitou-se sua capacidade em 15MW, onde se simulou a rede como um gerador, pois, caso fosse utilizado uma rede de fato, a rede seria infinita e, devido a isso, não seria possível controlar o limite máximo no *software matlab*. Por isso, optou-se pelo uso de um gerador simulando a rede de 15MW, para se obter o limite máximo. Caso o limite máximo de 15MW de potência seja atingido, há a ocorrência de um *blackout*, ou seja, um apagão. Portanto, a definição de 15MW se deu de forma proposital. Para o transformador, escolheu- se um transformador abaixador, de média tensão e Y (estrela) aterrado de 25kV/600V, optando-se assim pelo transformador mais simples para o circuito. Além disso, inseriu-se um painel fotovoltaico com capacidade de 8MW, com 10% de eficiência e área de $15e^4$ em m^2. Ademais, conectou-se o painel fotovoltaico à potência instalada do sistema, simulando a rede elétrica e o interligando às cargas residenciais e industriais. Para a carga residencial, definiu-se um valor base de 10MW de capacidade e 0,15 de fator de potência (FP), e uma carga industrial com 0,16MVA, (fator reativo e ativo às cargas). Em suma, com a implementação do circuito, realizou-se então um balanceamento de carga, pois, com o sistema em modo permanente, o *power grid* e a carga, quando adicionados a geração solar fotovoltaica, geraram a curva de pato conforme pode ser visualizado na Figura 4.

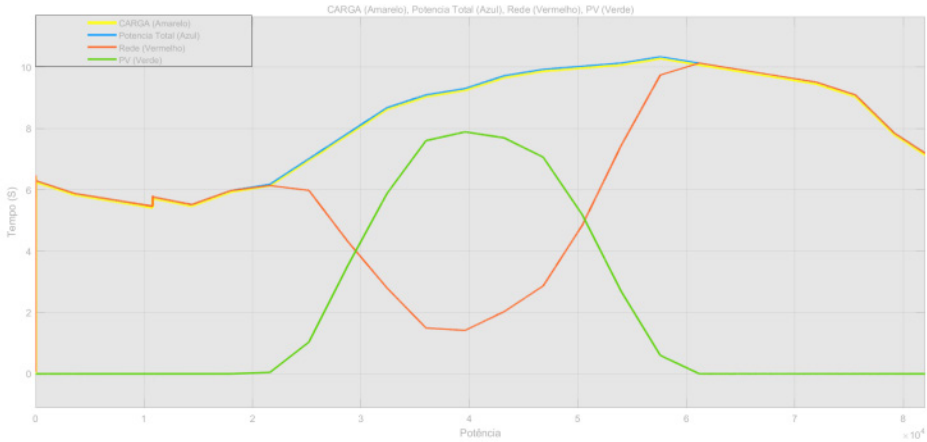


Figura 4 - Curva de Carga entre a soma total das demandas das cargas residenciais e industriais e a potência total do sistema.

Fonte: Autoria própria

Na Figura 4 também pode-se ver no circuito o bloco *irradiance* usando *unlock up* que sobe e desce, ou seja, faz exatamente o que o Sol faz. As cargas foram definidas e diferenciadas por cores para efeito de visualização nos gráficos gerados. As cargas residenciais e industriais foram representadas pela cor amarela, e a potência total representada pela cor azul. Para a energia solar gerada pelos painéis fotovoltaicos utilizou-se a cor verde e, assim, através do *scope*, se fez possível gerar o gráfico das curvas.

Na Figura 4 também pode-se ver no circuito o bloco irradiance usando um *lock up* que sobe e desce, ou seja, é utilizado para se comportar de forma semelhante ao Sol. As cargas foram definidas e diferenciadas por cores para efeito de visualizaçao nos gráficos gerados. As cargas residenciais e industriais foram representadas pela cor amarela, e a potência total representada pela cor azul. Para a energia solar gerada pelos painéis fotovoltaicos utilizou-se a cor verde e, assim, através do scope, se fez possível gerar o gráfico das curvas.

Aos resultados, observou-se através do mesmo circuito da Figura 3, porém, com a inserção de um sistema de armazenamento de energia com baterias, para que se observe o comportamento das curvas de carga, enquanto curva de pato, a partir do uso de um banco de baterias como backup para a rede. Dessa forma, os resultados obtidos foram através das baterias, onde a energia fotovoltaica será armazenada, porém, a curva de geração se manterá. Entretanto, conforme o fotovoltaico for desligando, para que não ocorra a inserção direta da energia solar na rede elétrica, a energia armazenada nas baterias será utilizada. Para visualizar a mitigação da curva, foram gerados gráficos, aos quais podem ser vistos através das Figura 5, Figura 6 e Figura 7.

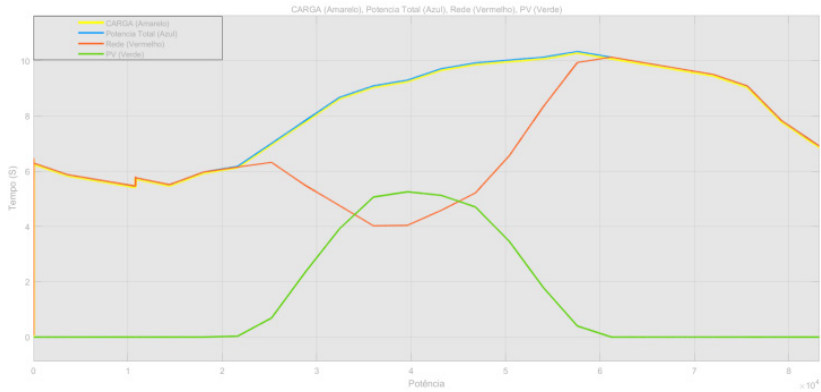


Figura 5 – Primeiro gráfico da Curva de Pato sendo mitigada.

Fonte: Autoria própria.

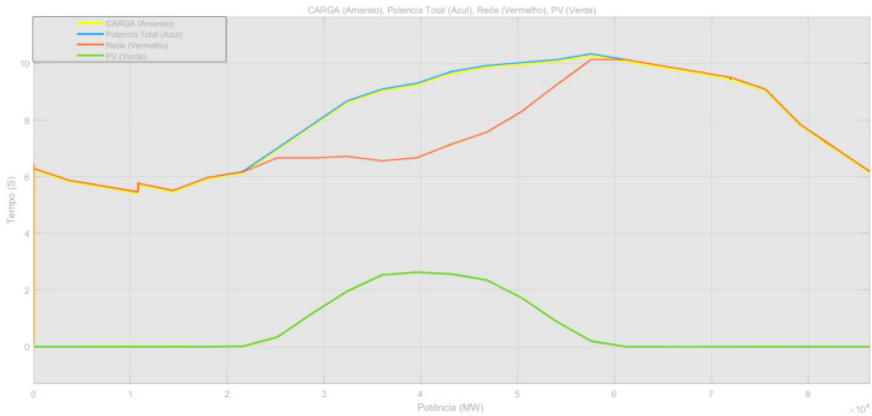


Figura 6 – Segundo gráfico da Curva de Pato sendo mitigada.

Fonte: Autoria própria.

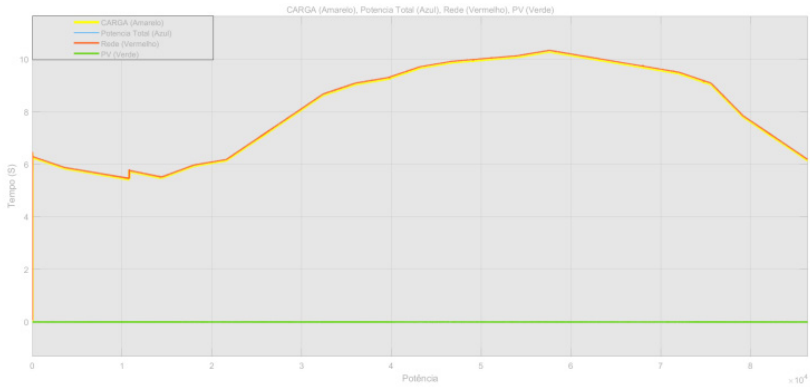


Figura 7 – Terceiro gráfico da Curva de Pato sendo mitigada.

Fonte: Autoria própria.

Assim, com base nas simulações feitas e nas análises dos gráficos, viu-se que o problema da curva de pato pode ser mitigado através da adesão de sistemas de armazenamento. Entretanto, os resultados analisados tiveram como base a diminuição gradual da área dos painéis fotovoltaicos em metros quadrados, partindo inicialmente de para, depois para e, finalmente, até zerar e, consequentemente, diminuir a curva.

Logo, analisando-se as simulações, observa-se que o sistema de armazenamento permite o aproveitamento e armazenamento da produção de energia solar do meio-dia para uso durante o pico da noite e, dessa maneira, reduzir a necessidade de outras fontes de energia para suprir a rampa da noite (*ramp up*). A interligação entre as tecnologias solares e de armazenamento também reduzem o custo para consumidores e concessionárias e, de forma simultânea, eleva a confiabilidade da rede.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As preocupações causadas pela influência da Geração Distribuída Fotovoltaica na Curva de Pato que causam impactos à Rede Elétrica ainda são de pouco conhecimento público no cenário brasileiro e em alguns lugares do mundo, sendo o caso mais conhecido o ocorrido na Califórnia, conforme California ISO (2016). Dessa maneira, alguns aspectos dessa pesquisa tornaram-se importantes ao longo de sua realização, pois, desde a revisão bibliográfica até a elaboração do circuito simulado, se fez possível observar as consequências que a Curva de Pato pode causar em um Sistema Elétrico, causando desequilíbrio de Rede, como o excesso de energia injetada diretamente na Rede, ocasionando grandes problemas ao Sistema Elétrico.

Percebeu-se também que, com a inserção de um *power grid* maior que 15MW, como foi utilizado no estudo, poderia acarretar um apagão na Rede Elétrica, além de ser necessário utilizar-se de uma fonte de energia que atue no sistema para além da geração fotovoltaica. Observou-se também que, para se alimentar o painel solar de 8MW, era necessário o uso de um *power grid.* Com a rede máxima em 15MW, notou-se que é possível que entre os horários de 12h e 13h a rede “puxe” a capacidade de 15MW do *power grid* com os 8MW do sistema fotovoltaico, somando uma carga de 22MW. No entanto, a carga do fotovoltaico poderia entrar em regime de falta e, assim, as cargas seriam balanceadas, voltando ao ponto anterior.

Por fim, ao realizar-se a simulação do circuito, obteve-se então o gráfico da Curva de Pato e, a partir disso, fez-se possível encontrar uma maneira de mitigar a curva. Conforme visto na Figura 7, a curva pôde ser mitigada, ilustrando que sistemas de armazenamento para a geração distribuída fotovoltaica, em especial, o armazenamento com baterias equilibra o sistema elétrico e impede que a energia da geração fotovoltaica seja injetada diretamente na rede.

Finalmente, conclui-se que, apesar dos percalços durante a execução do estudo e da complexidade dos fatores que se apresentaram ao longo dos testes realizados, os resultados são tidos como satisfatórios dentro do que foi proposto, no que tange a inserção de banco de baterias a GDFV para amenizar a Curva de Pato gerada e, assim, mostrou-se que este é sim um ponto positivo ao Sistema Elétrico.

Para possíveis trabalhos futuros, estabelece-se que neste estudo a metodologia utilizada pode ser aplicada para qualquer carga, desde que se tenham os dados referentes à região a qual se queira analisar, desde o uso de dados básicos de operação, até dados específicos. No entanto, alguns assuntos abordados necessitam de mais novas pesquisas, para se obter mais detalhes acerca da implantação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, avaliando não somente a geração dos sistemas fotovoltaicos, bem como as melhorias na qualidade das redes conforme as tecnologias empregas.

Por fim, tem-se que o estudo tinha como objetivo avaliar e propor uma solução para o problema da Curva de Pato e, a partir do que foi proposto, considera-se que o resultado obtido foi satisfatório, entretanto, a escolha da utilização de dados básicos se dá por alguns motivos, entre eles, o tempo disponibilizado para a realização, pois, para se realizar uma pesquisa mais aprofundada e mais complexa, seria necessário um tempo maior para a sua realização, bem como elaborar diversos cálculos e realizar um estudo aprofundado sobre controle e harmônicas. Sendo assim, optou-se portanto, por uma via mais objetiva e simples, tratando única e especificamente sobre o problema da Curva de Pato e a sua influência em relação às Redes Elétricas.

REFERÊNCIAS

PAIXAO, J. L. D.; ABAIDE, A. D. R. Métricas para a Avaliação do Impacto da Geração Distribuída Fotovoltaica na Curva de Carga. Centro de Excelência em Energias e Sistemas de Potência - CEESP, p. 2, 2021.

CASTRO, G. et al. TDSE 79: Impactos Sistêmicos da Micro e Minigeração Distribuída. [S.l.: s.n.], 2018. v. 79. 1–62 p. ISBN 9788593305467.

California ISO. *What the duck curve tells us about managing a green grid. Technical Report*, p. 4, 2016. Disponível em: <FlexibleResourcesHelpRenewables_FastFacts.pdf (caiso.com)>.

COPETTI, J. B.; MACAGNAN, M. H. Baterias em sistemas solares fotovoltaicos. Anais do I Congresso Brasileiro de Energia Solar, p. 1–10, 2007.

AYRÃO, V. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil – Conceitos, Aplicações e Estudos de Caso. **International Copper Association Brazil**, 2018.

BOCCHI, N.; FERRACIN, L. C.; BIAGGIO, S. R. **Pilhas e Baterias: Funcionamento e Impacto Ambiental**. [S.1.: s.n.], 2000. V. 11. 3-9p.

BORTOLOTO, V. A. et al. Geração de Energia Solar On Grid e Off Grid. VI Jornada Científica e Tecnológica, p. 6, 2017. Disponível em http://www.fatecbt.edu.br/ocs/index.php/VIJTC/VIJTC/paper/viewFile/1069/1234>.

BOWMAN, D. M. et al. Fire in the Earth System. Science, v. 324, n. 5926, p. 481-484. 2009. ISSN 00368075.

BORBA, M. C. V.; GASPAR, N. F. **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho.** [S.1.: s.n.], 2007. 300 p. ISBN 9789069845319.

DANIEL, P. et al. Paradigmas da energia solar no Brasil e no mundo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 241-247, 2016.

DENHOLM, P. et al. Overgeneration from Solar Energy in California: A Field Guide to the Duck Chart (NREL/TP-6A20-65023). **Technical Report**, n. November, p. 46, 2015. Disponível em: http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65453.pdf.

DOMINGOS, S. F.; MONTEIRO, L. G.; BOAVENTURA, W. d. C. Estado da Arte Para Previsão da Radiação Solar. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS 2018**, p. 11, 2020. Disponível em: https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/742.

ELÉTRICO, O. N. d. S. **Atuação ONS no Sistema Elétrico**. 2022. 1-9 p. Disponível em: http://www.ons.org.br/paginas/sobre-ons/atuacao.

FERREIRA, J. H.; TAVARES, C. Desenvolvimento, Implementação e Simulação de um Controlador para Sistemas de Armazenamento de Energia com Baterias. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em Engenharia Electrotécnica e de Computadores., único., p. 131, 2015.

GÖNEN, T. Electric Power Distribution System Engineering. [S.1.: s.n.], 2018. V. 94. IFC p. ISSN 01420615.

HIL, S.; REBECHI, R. I. O. O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Conectada ao Sistema de Distribuição Urbano: estudo de caso para um alimentador com pico de carga diurno. 100 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

IDEAS, P. Batteries – Types & working. 2022. 1-12 p.

CAPÍTULO 9

AVANÇOS NA TECNOLOGIA DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO PARA MOBILIDADE ELÉTRICA SUSTENTÁVEL: UM FOCO NA DEGRADAÇÃO

Data de submissão: 12/03/2024 *Data de aceite: 01/04/2024*

Jordan Passinato Sausen
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/8776511917988173

Bruno Knevitz Hammerschmitt
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/4865207592578956

Marcelo Bruno Capeletti
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/1922799731958383

Joelson Lopes da Paixão
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/8009856508464151

Carlos Henrique Barriquello
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/4127396473202565

Alzenira da Rosa Abaide
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/2427825596072142

Paulo Sérgio Sausen
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática Aplicada
Ijuí – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/6907289379766915

RESUMO: O crescente impacto das emissões de gases de efeito estufa e as consequentes preocupações ambientais têm impulsionado avanços significativos na tecnologia de baterias recarregáveis, especialmente em relação à mobilidade urbana sustentável. A exploração da característica bidirecional dos veículos

elétricos como recurso energético distribuído reflete uma tendência promissora em estratégias de gerenciamento energético que buscam lidar com a intermitência da geração renovável. No entanto, é importante enfrentar desafios como a degradação da bateria devido ao aumento de ciclos de carga e descarga. Este capítulo se propõe a descrever o cenário tecnológico atual das baterias de íons de lítio, explicar suas especificações, além de descrever os principais mecanismos de degradação no contexto da mobilidade urbana. Diante do cenário atual, torna-se imprescindível compreender profundamente o funcionamento, a degradação associada ao seu uso, bem como os desafios enfrentados pelos controladores que integram essa tecnologia no sistema elétrico de potência a partir de trocas bidirecionais de energia.
PALAVRAS-CHAVE: Mobilidade elétrica sustentável; baterias de íons de lítio; degradação da bateria; V2G.

ADVANCES IN LITHIUM ION BATTERY TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE ELECTRIC MOBILITY: A FOCUS ON DEGRADATION

ABSTRACT: The increasing impact of greenhouse gas emissions and subsequent environmental concerns have spurred significant advancements in rechargeable battery technology, particularly concerning sustainable urban mobility. The utilization of bidirectional capabilities in electric vehicles as a distributed energy resource reflects a promising trend in energy management strategies to address the intermittency of renewable generation. However, challenges such as battery degradation due to increased charge and discharge cycles must be addressed. This article aims to elucidate the current technological landscape of lithium-ion batteries, delineate their specifications and outline the primary degradation mechanisms within the context of urban mobility. Given the current scenario, it becomes imperative to deeply comprehend their operation, degradation mechanisms, as well as the challenges faced by controllers integrating this technology into the grid with bidirectional energy exchanges.
KEYWORDS: Sustainable electric mobility, Lithium-ion batteries, Battery degradation, V2G.

INTRODUÇÃO

O crescente impacto das emissões de gases de efeito estufa e as consequentes preocupações ambientais têm impulsionado avanços significativos na tecnologia de baterias recarregáveis, especialmente em relação à mobilidade urbana sustentável no contexto de redes elétricas inteligentes. A exploração da característica bidirecional dos Veículos Elétricos (VEs) e dos armazenadores estáticos para aproveitar recursos energéticos distribuídos reflete uma tendência promissora em estratégias de gerenciamento energético que buscam lidar com a intermitência da geração renovável. No entanto, a eficácia e a durabilidade dessas baterias estão intimamente ligadas à sua capacidade de manter o desempenho ao longo do tempo, enfrentando desafios significativos de degradação.

Este capítulo se propõe a descrever o cenário tecnológico atual das BIL, explicar seus princípios de funcionamento e especificações, além de analisar os principais mecanismos de degradação. A compreensão dos mecanismos subjacentes à degradação é essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação e para garantir a segurança e a confiabilidade das BIL em aplicações bidirecionais com o sistema elétrico de potência.

Ao longo deste capítulo, examinaremos os fatores externos e internos que contribuem para a degradação das BIL, destacando como variações na temperatura, taxa de carga/descarga e profundidade de descarga podem afetar diretamente sua vida útil e desempenho. Além disso, exploraremos as diferentes formas de degradação, desde a formação de camadas de interface sólida até a fratura dos eletrodos, e discutiremos os efeitos adversos desse processo, incluindo a diminuição da capacidade e potência, além de problemas de segurança.

Por fim, analisaremos a relação entre a profundidade de descarga (DoD) e a degradação das BIL, fornecendo insights sobre como diferentes níveis de DoD podem afetar sua estrutura e capacidade. Ao compreendermos melhor a complexidade da degradação em BIL, estaremos preparados para enfrentar os desafios associados ao uso dessa tecnologia em aplicações Veículo à Rede (*Vehicle-to-Grid* - V2G) e desenvolver soluções inovadoras para garantir seu desempenho e confiabilidade no contexto da mobilidade urbana sustentável das redes elétricas inteligentes.

BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO: CENÁRIO ATUAL

A tecnologia de baterias recarregáveis compostas por íons de lítio, concebida por um pesquisador da Exxon Mobil Corporation na década de 1970 e inicialmente comercializada pela Sony em 1991, representa uma inovação que revolucionou diversos setores, desde eletrônicos de consumo até VEs (BLOOMBERG NEF, 2019). Seu princípio básico de funcionamento envolve o transporte de íons de lítio através de um eletrólito, movendo-se entre um cátodo positivo e um ânodo negativo durante os processos de carregamento/descarregamento. Com o uso de materiais variados no cátodo, como cobalto, níquel e manganês, a capacidade de armazenamento e as aplicações das BIL foram significativamente ampliadas, abrangendo agora os VEs que se integram aos sistemas de potência em trocas bidirecionais de energia.

Por ser seu único meio de armazenamento energético, a bateria determina a autonomia do VE e devido ao custo, peso e volume elevados, se torna objeto de frequente estudo. O panorama composto por projetos de pesquisa e desenvolvimento em associação a produção em massa de baterias estão conduzindo à rápida redução de custos e aumento de densidade energética, indicando, portanto, constantes sinais de aperfeiçoamentos que confirmam a continuidade da tendência de estreitamento da lacuna de preço entre VEs e veículos de combustão interna (BAJOLLE; LAGADIC; LOUVET, 2022).

No Brasil, o Ministério de Minas e Energia está elaborando um programa multisetorial para a região do Vale do Jequitinhonha, que se destaca mundialmente na produção de minério (MME, 2024). Essa ação marca a entrada do país no mercado global de lítio para baterias com o suporte ao projeto de uma das maiores produtoras mundiais de Lítio (BLOOMBERG LÍNEA, 2024).

Apesar do contínuo crescimento da demanda por BIL em VEs e sistemas de armazenamento de energia estacionários, a superprodução e a capacidade excessiva de baterias moldarão a dinâmica do mercado em 2024. Prevê-se uma queda nos preços dos pacotes de BIL devido à queda nos preços de matérias-primas, componentes e em função do aumento da capacidade de produção em toda a cadeia de valor da bateria, enquanto o crescimento da demanda ficou aquém das expectativas da indústria (BLOOMBERG NEF, 2023). A Figura 1 demonstra que, após um aumento sem precedentes em 2022, o preço dos pacotes de baterias caiu 14% em 2023, atingindo um recorde de US$ 139/kWh.

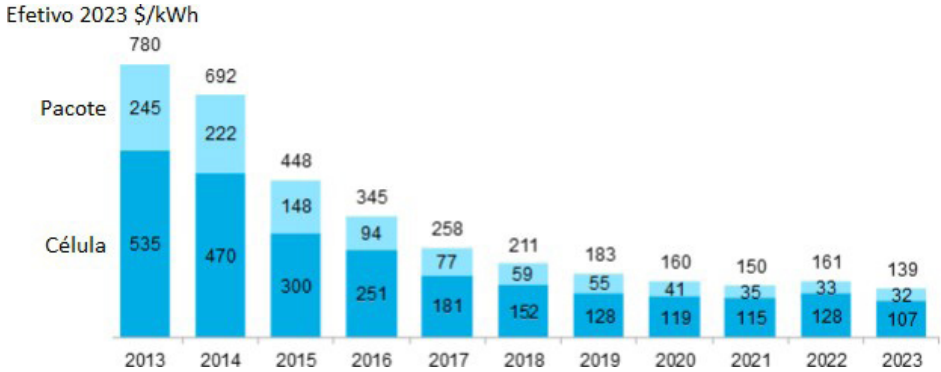


Figura 1 – Histórico de evolução de custo das BIL.

Fonte: (BLOOMBERG NEF, 2023).

Os VEs são equipados com um conjunto de BIL composto por módulos individuais, formados por células conectadas em série e paralelo. Devido às suas propriedades químicas, as BIL continuam a ser a escolha mais vantajosa para a mobilidade elétrica. Dentre as principais características, destacam-se longa vida útil, alta densidade energética e eficiência superior em comparação com outros tipos de baterias e, especialmente, a capacidade razoável de ciclo profundo na implementação do fornecimento de energia do V2G (YILMAZ; KREIN, 2013).

COMPREENDENDO AS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Esta seção explica as especificações presentes nos datasheets usados para descrever células, módulos e pacotes de baterias (MIT, 2008). O estado de carga (*State of Charge* – SoC) é uma expressão da capacidade atual da bateria na forma de porcentagem em função de sua capacidade máxima. A estimativa do SoC sempre foi um desafio e sua acurácia não é a mesma em detrimento a quantidade de líquido combustível em um tanque do veículo a combustão. Geralmente o SoC é calculado usando a integral da corrente para determinar alterações na capacidade da bateria ao longo do tempo.

A profundidade de descarga (DoD) é a porcentagem de capacidade da bateria que foi descarregada, expressa na forma de porcentagem em função de sua capacidade máxima. Enquanto a tensão terminal da bateria é medida em seus terminais com carga conectada, variando de acordo com o SoC e a corrente de des/carregamento, a tensão de circuito aberto (*Open-Circuit Voltage* – OCV) é medida em seus terminais sem carga conectada, de modo que quanto maior o SoC, maior a OCV. Essas métricas são importantes para determinar as condições da bateria.

A tensão nominal refere-se a tensão de operação da bateria. A tensão de c*ut- off* é a mínima tensão de operação permissível, a qual geralmente define o estado "vazio" da bateria (SoC = 0%). A capacidade nominal refere-se à capacidade de descarga total, expressa em Amperes-hora (Ah), a uma determinada taxa de descarga (*C-rate*[1]) a partir de 100% de SoC até atingir a tensão de *cut-off* (MIT, 2008). A energia nominal refere-se à capacidade total, expressa em Watt-hora (Wh), disponível quando a bateria é descarregada a uma determinada taxa de descarga a partir de 100% de SoC até atingir a tensão de *cut-off*. A capacidade, dada em Ah ou Wh, relata diretamente o número de mols (átomos e moléculas) de Lítio que vão e voltam entre os eletrodos positivo e negativo durante os processos de des/carregamento.

O ciclo de vida é dado em função de uma DoD específica e determina o número de ciclos de carga/descarga que a bateria pode realizar antes de atingir um critério de desempenho específico. O ciclo de vida é estimado para condições específicas des/carga, uma vez que a vida operacional da bateria é afetada por diversos fatores, em especial, a profundidade dos ciclos (DoD). Tipicamente, o final da vida de uma bateria é definido quando a bateria degrada até o ponto onde apenas 70-80% da capacidade que a mesma detinha ao início da vida remanesce sob condições nominais de operação.

Os fabricantes de VEs devem contabilizar a perda de capacidade que ocorre com o passar do tempo, cuja solução do problema se dá por meio do sobredimensionamento da bateria (BATTERY UNIVERSITY, 2020). Conforme a bateria se degrada, a faixa de DoD deve se expandir para manter a mesma autonomia de quando nova, conforme ilustrado na Figura 2 a partir de três faixas de saúde da bateria (*State of Health* – SoH).

1. A taxa "C" é uma unidade de medida em que a bateria é carregada ou descarregada em relação a sua capacidade máxima. Usualmente medida em 1C, a capacidade significa que uma bateria de 1 kWh completamente carregada deve prover 1 kW durante 1 hora. A taxa 1C também significa uma carga completa em 1 hora, 2C carga completa em 30 minutos e assim por diante (MIT, 2018).

Geralmente a recarga das células das baterias ocorre em duas etapas, conforme demonstra a Figura 3. Enquanto a primeira etapa apresenta uma corrente constante e uma tensão com característica de crescimento exponencial, a segunda etapa compreende uma tensão constante e uma corrente com características semelhantes a uma função logarítmica.

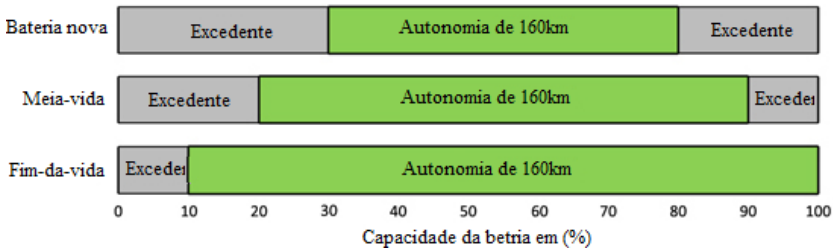


Figura 2 - Autonomia em função da performance da bateria.

Fonte: (BATTERY UNIVERSITY, 2021).

O tempo total necessário para a recarga completa do veículo depende de diversos fatores, com destaque para o estado de carga (SoC) da bateria, taxa de recarga suportada e a capacidade de carga elétrica da bateria (PAPADOPOULOS et al., 2010). Quanto maior for a potência de carregamento menos tempo será requerido para a recarga completa, ao contrário da capacidade da bateria. Portanto, o período em que o veículo permanecerá conectado à rede para recarga é dependente das condições da bateria e características de carregamento.

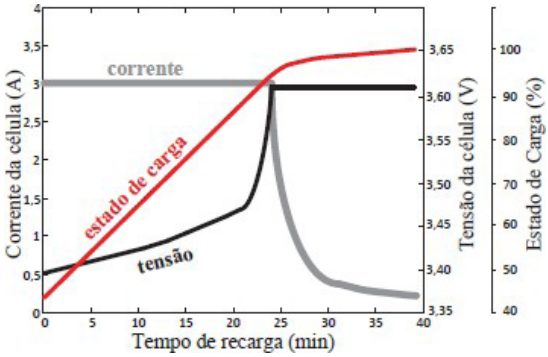


Figura 3 - Curva característica de carregamento de BIL.

Fonte: RODRIGUES, et. al (2014).

É essencial reconhecer que um dos principais desafios associados à tecnologia bidirecional dos VEs é a minimização da degradação das baterias, visto que é bem estabelecido na literatura científica que as BIL enfrentam desafios de envelhecimento e degradação ao longo do tempo (UDDIN et al., 2017), principalmente quando submetida a vários ciclos de

carreamento/descarregamento frequentemente. Desse modo, a tarefa de compreender os mecanismos de envelhecimento e desgaste de baterias é particularmente complicada uma vez que a degradação se origina a partir de uma variedade de fatores interligados.

Tendo em vista que as baterias representam um dos componentes mais significativos e dispendiosos dos VEs, o custo associado à degradação tem um impacto direto nos benefícios econômicos da sua aplicação na mobilidade elétrica e como ferramenta de suporte a operação de sistemas elétricos de potência, cujos mecanismos serão explorados em detalhes.

MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO EM APLICAÇÕES BIDIRECIONAIS

Na literatura, existem diversos esquemas para utilizar as baterias de VEs ao invés, ou em adição, a baterias estacionárias para lidar com a intermitência da geração renovável em sistemas elétricos de potência (AMJAD et al., 2018). Dentre os desafios para adoção da operação bidirecional dos VEs estão a degradação da bateria causada pelos ciclos frequentes, custos adicionais para conversores bidirecionais, questões de medição e preocupações de interface, bem como proteção anti-ilhamento e outros itens de interconexão que devem ser contempladas para implementação efetiva de algoritmos de controle (LIU et al., 2023).

A bateria é um dispositivo que converte energia química em energia elétrica e vice versa. O princípio operativo de uma bateria de íons de lítio consiste de um cátodo (eletrodo positivo), um ânodo (eletrodo negativo) e um eletrólito como condutor. O cátodo é de óxido de metal enquanto o ânodo é de carbono poroso (SMITH et al., (2012). Durante a descarga, os íons fluem do ânodo ao cátodo através do eletrólito e separador. O processo de carregamento reverte essa direção e os íons fluem de cátodo ao ânodo (YUE et al., 2019).

Considerando as complexas reações eletroquímicas dos elétrons de lítio e a influência de muitos fatores externos nas reações internas, diferentes mecanismos de degradação e efeitos podem ocorrer. Para melhor compreender a degradação das BIL, quatro aspectos cruciais merecem destaque: fatores externos, fatores internos, formas de degradação e seus efeitos, conforme sumarizado na Figura 4.

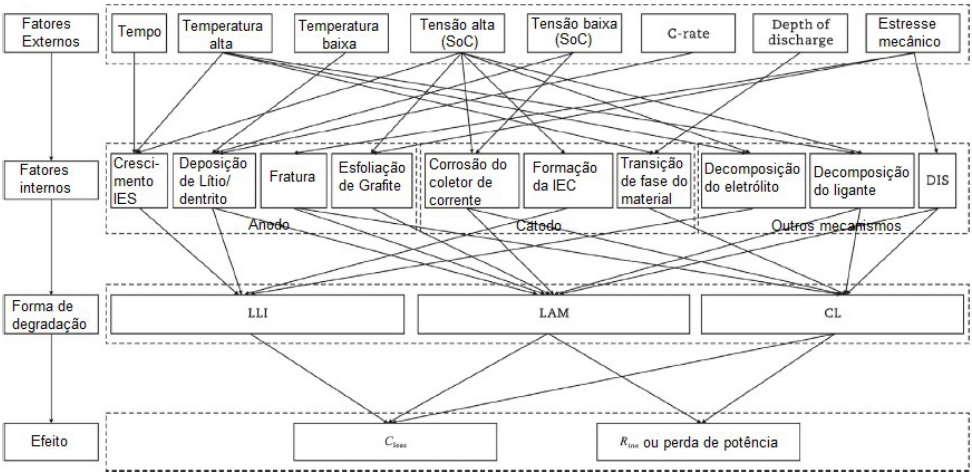


Figura 4 – Efeitos de diferentes fatores na degradação.

Fonte: Adaptado de (LIU et al., 2023).

Os fatores externos desempenham um papel significativo na degradação das BIL. Variações na temperatura ambiente, taxa de carga/descarga (*C-rate*), profundidade de descarga (DoD) e tempo de carregamento influenciam diretamente a vida útil da bateria (TIAN et al., 2020). Por exemplo, altas taxas de *C-rate* podem resultar em acumulação de dendritos de lítio na superfície do eletrodo, enquanto uma temperatura ambiente elevada acelera a degradação interna da bateria, aumentando a resistência interna e promovendo o espessamento da Interface de Eletrólito Sólido (IES), nome dado a acumulação de material no ânodo resultante da decomposição do eletrólito (WANG et al., 2018).

Internamente, a estrutura e composição das BIL são afetadas por vários processos mecânicos, térmicos e químicos que contribuem para sua degradação. A formação de IES, fraturas de eletrodos e formação de dendritos de lítio são alguns dos principais mecanismos de degradação interna (MATSUDA et al., 2019). A perda gradual de material ativo nos eletrodos, como resultado desses processos, contribui para a diminuição da capacidade e da resistência interna das baterias.

As formas de degradação das BIL são multifacetadas, envolvendo vários processos complexos. A degradação do ânodo ocorre principalmente devido à formação da camada de IES, fraturas de eletrodos e crescimento de dendritos de lítio (YANG et al., 2017a). Por outro lado, a degradação do cátodo é influenciada pela perda de material ativo, principalmente devido à corrosão causada por ácido fluorídrico e à formação de camadas de interface cátodo-eletrólito (CEI) (CHEN et al., 2007). Tanto o ânodo quanto o cátodo sofrem perdas de capacidade devido a mudanças na estrutura cristalina dos materiais, fraturas e outros processos internos.

Os efeitos da degradação das LIB são significativos e abrangentes. Além da diminuição da capacidade e da vida útil, a degradação das BIL pode levar a sérios problemas de segurança, como curtos-circuitos e explosões (VERBRUGGE et al., 2020). A capacidade de prever e mitigar esses efeitos é crucial para garantir o desempenho e a segurança contínuos das BIL em trocas bidirecionais de energia nas redes elétricas inteligentes.

As principais métricas convencionais predominantes para avaliar a degradação são o estado de carga (SoC) para o envelhecimento por calendário e a profundidade de descarga (DoD) para a degradação em função dos ciclos. Enquanto a primeira afeta a autonomia do VE, uma vez que reduz a capacidade de armazenamento, a segunda se traduz no aumento de resistência interna ou impedância da célula, a qual limita a capacidade de potência, reduzindo a eficiência do veículo.

ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO EM FUNÇÃO DA DOD

A maioria dos estudos aponta que a capacidade de BIL decai com os ciclos de carregamento e a magnitude dessa perda é dependente do número de ciclos e da DoD submetida a bateria durante esses ciclos (LIU et al., 2023). Neste sentido, em conjunto com a frequência de ciclos, a métrica de análise de degradação predominante em função do ciclo é a DoD SMITH et al., (2017). Conforme a DoD é aumentada, principalmente em relação à descarga profunda (i.e., próximo a extremidade inferior do SoC), a degradação é intensificada. Entretanto, a influência da DoD na vida útil de uma bateria é complexa.

Uma compilação de estudos permite ilustrar a perda de capacidade em função do aumento de ciclos e os possíveis mecanismos internos em diferentes estágios de degradação em função da DoD na Figura 5. Em síntese, os efeitos de altas DoDs intensificam a expansão volumétrica e estressam os eletrodos da bateria, resultando em alterações severas de estrutura e volume que ocasionam perda de capacidade e potência.

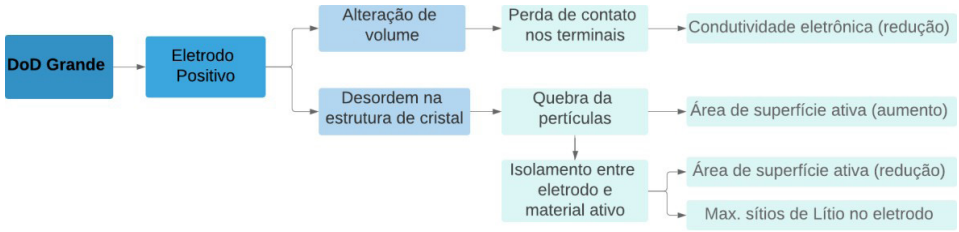


Figura 5 - Degradação de BIL em função da DoD.

Fonte: Adaptado de (UDDIN et al., 2016).

Cargas elétricas e térmicas também causam degradações eletroquímica e mecânica oriundas de alterações volumétricas do material ativo. Diante disto, para controlar a degradação é necessário um acompanhamento acurado do histórico dos fatores de estresse em função de um determinado ciclo de utilização da bateria, os quais são condicionados a utilização do veículo. Bem como de um sistema de controle adequado para o uso de baterias em sistemas elétricos de potência, que tendem a aumentar a DoD em função do uso V2G.

É difícil mensurar precisamente a degradação da bateria em serviços V2G devido ao processo complexo, o qual é baseado em uma série de fatores e ocorre preponderantemente devido a reações químicas secundárias durante o armazenamento e reações eletroquímicas secundárias durante os ciclos, se manifestando em diferentes formas (UDDIN et al., 2017). Enquanto a primeira diz respeito ao envelhecimento natural, por ação do tempo, a segunda se dá em função dos ciclos de carga e descarga.

DESAFIOS DO V2G

A taxa de degradação é fortemente dependente de condições operacionais da bateria. A partir de uma revisão de diferentes modelos de degradação disponíveis na literatura, ainda não há um consenso comum em relação ao potencial benefício econômico do V2G pois a avaliação particular de cada caso é condicionada a diferentes considerações e cada trabalho apresenta condições operativas diferentes para sustentar seus resultados (AHMADIAN et al., (2018).

O principal problema da associação de custos de degradação de bateria em esquemas de controle da recarga é a dificuldade em descrever as particularidades características dos diferentes tipos de bateria, uma vez que seus ciclos de vida variam amplamente de acordo com a composição química e processo de fabricação. Embora essas diferenças possam ser distinguidas por meio de parâmetros variáveis, dados experimentais devem ser conhecidos para determinar os parâmetros particulares de uma bateria específica. Os modelos de bateria são obtidos por meio do ajuste de curvas experimentais ou por meio da exploração da sua estrutura química, a qual também têm seus modelos derivados a partir de dados experimentais.

Usualmente dados relativos ao ciclo de vida de baterias são disponibilizados em termos de Contagem de Ciclos Factíveis (CCF) pelos fabricantes, os quais são relacionados ao estado de carga (SoC). Porém, o uso da bateria ocorre em diversos níveis de profundidade de descarga (DoD), logo, o uso desse tipo de dados é limitado a uma estimação grosseira do ciclo de vida da bateria.

A otimização do controle inteligente pode garantir que a taxa de degradação adicional ao uso dos VEs em operações V2G seja minimizada ou até mesmo, em alguns casos, a vida útil da bateria pode ser estendida. Um exemplo é a manipulação do SoC do VE de tal forma que o ciclo ocorra na região de menor resistência interna, de forma a minimizar a degradação (UDDIN et al., (2017). Desse modo, algumas pesquisas visam aprimorar o ciclo de vida útil das baterias, motivados pela redução de custo por unidade de energia armazenada (ASEF et al., 2021).

CONCLUSÃO

O capítulo abordou de forma abrangente e detalhada o cenário atual das BIL, desde sua evolução tecnológica até os desafios enfrentados em aplicações bidirecionais, com foco na integração de VEs aos sistemas elétricos de potência. Foram discutidos diversos aspectos fundamentais para compreender seus princípios operativos e a degradação associada ao seu uso.

Variações na temperatura, taxa de carga/descarga, profundidade de descarga e tempo de carregamento foram identificados como fatores externos significativos que influenciam diretamente a vida útil das BIL. Internamente, os processos mecânicos, térmicos e químicos contribuem para a degradação das baterias.

Foram discutidos os principais mecanismos de degradação, tanto no ânodo quanto no cátodo, destacando a formação de IES, fraturas de eletrodos e crescimento de dendritos de lítio como processos internos críticos que levam à perda gradual de capacidade e aumento da resistência interna.

Além da diminuição da capacidade e da vida útil, que impactam diretamente na autonomia e potência dos VEs, bem como sua capacidade de fornecer energia em situações V2G, a degradação das BIL pode levar a sérios problemas de segurança, como curtos-circuitos e explosões.

Foi explorada a relação entre a DoD e a degradação das baterias, demonstrando como DoDs mais elevadas podem intensificar a degradação, afetando a estrutura e a capacidade das BIL. Diante do cenário atual, torna-se imprescindível compreender profundamente seu funcionamento, os estágios e mecanismos de degradação, bem como os desafios enfrentados pelos controladores que integram essa tecnologia no sistema elétrico de potência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio técnico e financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS, e Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Instituições Brasileiras.

REFERÊNCIAS

AHMADIAN, A.; SEDGHI, M.; ELKAMEL, A.; FOWLER, M.; GOLKAR, M. A. **Plug-in electric vehicle batteries degradation modeling for smart grid studies: Review, assessment and conceptual framework**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 81, p. 2609-2624, 2018.

ASEF, P.; MILAN, M.; LAPTHORN, A.; PADMANABAN, S. **Future Trends and Aging Analysis of Battery Energy Storage Systems for Electric Vehicles**. Sustainability, v. 13, p. 13779, 2021.

BAJOLLE, H.; LAGADIC, M.; LOUVET, N. **The future of lithium-ion batteries: Exploring expert conceptions, market trends, and price scenarios**. Energy Research & Social Science, v. 93, p. 102850, 2022.

BLOOMBERG LÍNEA. **Projeto em Minas Gerais marca entrada do Brasil no mercado global de lítio**, 2022. Disponível em: <ttps://www.bloomberglinea.com.br/2022/06/22/projeto-em-minas-gerais-marca- entrada-do-brasil-no-mercado-global-de-litio/>.

BLOOMBERG NEF. **Battery Reality: There's Nothing Better Than Lithium-Ion Coming Soon**. Nova Iorque, 2019. Disponível em: <ttps://www.bloomberg.com/news/articles/2019-04-03/battery-reality-there-s-nothing- better-than-lithium-ion-coming-soon>.

BLOOMBERG NEF. **Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of $139/kWh.** Nova Iorque, 2023. Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery- pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>.

CHEN, Y.; WANG, C.; LIU, G.; et al. **Selection of conductive additives in Li-ion battery cathodes: a numerical study**. Journal of the Electrochemical Society, v. 154, p. A978, 2007.

MIT, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **Introduction to batteries.** Electric Vehicle Team, 2018.

MME, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano social para uso dos recursos do lítio brasileiro** é **prioridade para o Ministério de Minas e Energia**, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/plano-social-para- uso-dos-recursos-do-litio-brasileiro-e-prioridade-para-o-ministerio-de-minas-e- energia>.

PAPADOPOULOS, ET AL. **Predicting Electric Vehicle Impacts on Residential Distribution Networks with Distributed Generation**. 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2010.

RODRIGUES, M. d. B.; et al. **Conexão de Veículos Elétricos à Rede de Energia Elétrica para Recarga de Baterias: Uma Visão Geral**. Eletrônica de Potência – SOBRAEP, v. 19, nº 2, p. 193-207, 2014.

SMITH, K. et al. **Comparison of plug-in hybrid electric vehicle battery life across geographies and drive cycles**. SAE Technical Papers, 2012.

TIAN, H.; QIN, P.; LI, K.; et al. **A review of the state of health for lithium-ion batteries: research status and suggestions**. Journal of Cleaner Production, v. 261, p. 120813, 2020.

UDDIN, K. et al. **On the possibility of extending the lifetime of lithium-ion batteries through optimal V2G facilitated by an integrated vehicle and smart-grid system**. Energy, v. 133, p. 710–722, 2017.

UDDIN, K. et al. **Characterising lithium-ion battery degradation through the identification and tracking of electrochemical battery model parameters**. Batteries, v. 2, n. 2, 2016.

VERBRUGGE, M. W.; XIAO, X.; BAKER, D. R. **Experimental and theoretical examination of low-current overcharge at lithiated-graphite porous electrodes**. Journal of The Electrochemical Society, v. 167, p. 080523, 2020.

WANG, P.; WANG, L.; WANG, S.; et al. **Influence of temperature on discharge capacity of 18650 ternary lithium batteries**. Technology Mark, v. 25, p. 10e14, 2018.

YANG, H.; ZHANG, S.; QIU, J.; QIU, D.; LAI, M.; DONG, Z. **CVaR-constrained optimal bidding of electric vehicle aggregators in day-ahead and real-time markets**. IEEE Trans. Ind. Inf., v. 13, p. 2555-2565, 2017.

YILNAZ, M.; KREIN, P. T. **Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utility interfaces**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 28, p. 5673–5689, 2013.

YONGTAO LIU, CHUANPAN LIU, YONGJIE LIU, FEIRAN SUN, JIE QIAO, TING XU. **Review on degradation mechanism and health state estimation methods of lithium-ion batteries**. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), v. 10, p. 578-610, 2023.

YUE, M. et al. **Review on health-conscious energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles: Degradation models and strategies**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 44, p. 6844–6861, 2019.

CAPÍTULO 10

CONTEXTUALIZAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E DE RECARGAS RÁPIDAS EM SISTEMAS DE ENERGIA E ENERGIA RENOVÁVEL

Data de submissão: 04/03/2024 *Data de aceite: 01/04/2024*

Marcelo Bruno Capeletti
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/1922799731958383

Bruno Knevitz Hammerschmitt
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/4865207592578956

Leonardo Nogueira Fontoura da Silva
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul http://lattes.cnpq.br/8009856508464151

Jordan Passinato Sausen
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/8776511917988173

Carlos Henrique Barriquello
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/4127396473202565

Alzenira da Rosa Abaide
Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/2427825596072142

RESUMO: A adoção de veículos elétricos surge como alternativa para a descarbonização do mercado de mobilidade. Com a adoção de veículos elétricos como parte integrante do sistema de mobilidade mundial, surge também o aumento na demanda por eletricidade. Isso implica na necessidade de investimentos em sistemas de energia capazes de lidar com esse expressivo acréscimo de carga. Os agentes de planejamento do sistema de energia precisam estar cientes e reconhecer padrões de recargas, especialmente as rápidas, que podem ocorrer durante momentos de pico de demanda do sistema. Também se torna

importante a integração dessa nova carga com a geração de energia renovável, para atingir a sustentabilidade no mercado de mobilidade através da adoção de veículos elétricos. A segurança energética e a disponibilidade de potência tornam-se primordiais. Diante disto, este trabalho contextualiza o sistema de energia brasileiro diante do aumento da demanda por veículos elétricos e carregamentos rápidos.
PALAVRAS-CHAVE: Veículos Elétricos; Estações de Recarga Rápida; Sistemas de Energia.

CONTEXTUALIZATION OF ELECTRIC VEHICLES AND FAST RECHARGING IN ENERGY SYSTEMS AND RENEWABLE ENERGY

ABSTRACT: Adopting electric vehicles appears as an alternative for decarbonizing the mobility market. With the adoption of electric vehicles as an integral part of the global mobility system, there is also an increase in demand for electricity. This implies the need for investments in energy systems capable of handling this significant increase in load. Energy system planning agents must be aware of and recognize charging patterns, especially rapid ones, that can occur during peak system demand. It is also important to integrate this new load with renewable energy generation to achieve sustainability in the mobility market by adopting electric vehicles. Energy security and power availability become Paramount. Therefore, this work contextualizes the Brazilian energy system in the face of increased demand for electric vehicles and fast charging.
KEYWORDS: Electric Vehicles; Fast Charging Stations; Power Systems.

INTRODUÇÃO

A inserção de Veículos Elétricos (VEs) em transporte de cargas e passageiros em larga escala emerge como uma alternativa sustentável para o mercado de mobilidade, sendo este fundamental para a economia global. Em conjunto, apresentam desafios consideráveis para o setor de eletroenergético, na disponibilidade de potência, na geração de energia e na garantia de abastecimento energético.

O sistema elétrico brasileiro está em constante processo de modernização e ampliação, diversificando fontes de geração de energia, e realizando implementação de novas tecnologias no gerenciamento da transmissão e distribuição de energia. Nos últimos anos, uma grande parcela de energia foi gerada por fontes de energia renovável intermitente, as quais não são possíveis serem armazenadas na sua forma primária. Por isso, se torna mais que necessário abastecer e incentivar o consumo nos momentos em que estas fontes de geração estão disponíveis, podendo os VEs contribuir para o benefício da eficiência energética, mitigando o problema de esgotamento da geração de energia baseada em combustíveis fósseis (TENG et al., 2020)

A mobilidade elétrica é um dos pontos chaves para transição energética, e um dos aspectos cruciais no desenvolvimento do sistema de energia do futuro, pois se apresenta como um grande acréscimo de carga para o sistema e, também, com a descarbonização do setor de mobilidade. Com isso, o entendimento de padrões nas seções de recargas, e

a compreensão de como esse incremento de carga irá se comportar em todo o sistema elétrico são imprescindíveis. O entendimento pode auxiliar na previsão e incentivar grupos de VEs no agendamento e antecipação das recargas de VEs, modulando o comportamento da carga visto pelo sistema elétrico, pode contribuir no aprimoramento de resposta à demanda e integração com energia renovável. Os desafios da inserção de VEs no sistema de energia são grandes, e intensificados pela necessidade de descarbonização e do uso de energias renováveis intermitentes.

A rápida adesão aos VEs resulta em uma procura significativa de infraestruturas de recarga (RIVERA et al., 2023), e sua adesão tem grande contribuição do ponto de vista ambiental (TAYYAB et al., 2021), sendo uma das mais promissoras soluções para redução de emissão de poluentes no setor de mobilidade. O sistema elétrico brasileiro tem características diferentes do resto do mundo, sendo majoritariamente constituído de energia renováveis, predominantemente energia a partir de hidrelétricas, com inserção da energia solar e eólica nos últimos anos, e com uma capacidade de armazenamento de energia por hidrelétricas despacháveis, sendo um grande laboratório para inserção de VEs de forma sustentável. Por isso, a inserção dos carros híbridos e elétricos deve ser avaliada, para assegurar a descarbonização e manter segurança energética (BARAN; LEGEY, 2011).

Devido ao desenvolvimento tecnológico, os carregadores rápidos de VEs estão elevando rapidamente a potência de recarga, bem como os veículos vem aumentando a capacidade de energia armazenada nas baterias. Com isso, em particular para os consumidores, diminui os pontos de atrito para aquisição de VEs. Porém, traz uma carga adicional ao sistema de energia. É essencial obter conhecimento do comportamento das recargas dos condutores de VEs e gerir a sua integração com o sistema de energia e energias renováveis. Essa será a base para preparar o sistema elétrico para que o acréscimo de carga seja realizado de forma sustentável, adequando o sistema quanto a disponibilidade de potência e na garantia de segurança energética. Assim, este trabalho tem o intuito de contextualizar as premissas do sistema de elétrico brasileiro com vista ao aumento da demanda por VEs e carregamentos rápidos.

RECARGAS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

Contextualização da Mobilidade Elétrica e Recargas Rápidas

Veículos puramente elétricos não são uma novidade, já em 1880 VEs foram empregados para transporte, em conjunto com o desenvolvimento de baterias. Porém, depois de 1930, foram deixados de lado, principalmente pela capacidade de autonomia e facilidade de carregamento de veículos a combustão, que por muitos anos dominaram o mercado (BARAN; LEGEY, 2011).

O setor de transporte e mobilidade é movido pelo alto consumo de combustíveis fósseis, que também gera um forte impacto ambiental. A inserção de VEs em larga escala trazem diversos benefícios para o setor de mobilidade, reduzindo danos ambientais e podendo auxiliar na segurança energética dos países, além de, no horizonte de longo prazo, os VEs terem custo de manutenção relativamente baixo, também serem mais econômicos e duráveis (FERREIRA; DIAS, 2021; LOGTENBERG; PAWLEY; SAXIFRAGE, 2018).

Nos últimos anos, diversos países já iniciaram a transição para mobilidade elétrica, tanto de veículos pesados como de veículos leves. Em todo o mundo, a perspectiva é de grande evolução do mercado de mobilidade elétrica nos próximos anos. A eletromobilidade já apresenta tendência de crescimento, como exposto na Figura 1, onde percebe-se um crescimento bastante expressivo na quantidade de VEs em estoque no mundo, sendo o número de VEs quase triplicado nos últimos 3 anos.

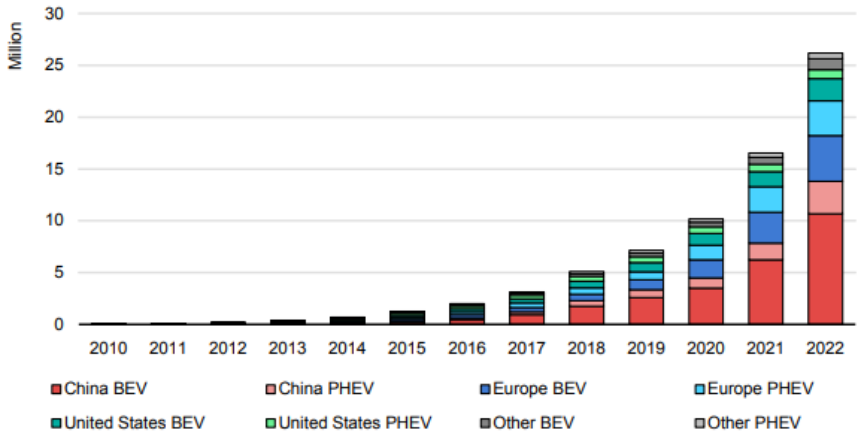


Figura 1 – Inserção do VE na mobilidade mundial

Fonte: (IEA, 2023)

Espera-se, que as vendas de VEs continuem crescendo fortemente nos próximos anos, ainda com o desenvolvimento das próximas gerações de baterias, os VEs devem continuar sua expansão no mercado de mobilidade. Alinhado a isto, a introdução de VEs no Brasil é uma alternativa à descarbonização no mercado de mobilidade, somado ao fato do sistema elétrico brasileiro ter grande parcela de energia gerada por fontes limpas. O Brasil vem se posicionando de forma estratégica para adoção de veículos puramente elétricos, sendo que automóveis eletrificados em 2022 representaram em torno de 2,3% de toda frota (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAFEA), 2023).

Os Veiculos Elétricos a Bateria (do inglês *Batery Electric Vehicle* – BEV) têm aumentado a sua participação no mercado nos últimos anos, atingindo a participação recorde de 47% entre os eletrificados no início de 2023 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO (ABVE), 2023). Ainda, segundo *International Energy Angency* (IEA, 2023), a estimativa global é de que em 2023 a venda de VEs chegue a 14 milhões de unidades, também, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), é estimado que até 2032, veículos híbridos representam 6,5% dos licenciamentos no Brasil (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), 2022).

No entanto, a inserção adequada de infraestruturas de recargas rápidas impõe uma série de desafios, como tempo de recarga, padronização das estruturas de recargas, processos regulatórios, e demanda de energia em sistemas de distribuição. Para realizar uma operação eficiente e limpa de VEs, as frotas devem otimizar seus processos de recarga ao considerar rotas que minimizem paradas, e explorar opções de recarga em locais com geração de energia renovável, como energia solar e eólica (BOMMANA et al., 2023).

O desenvolvimento de estruturas de recargas tem representado um dos mais importantes obstáculos para uma adoção em larga escala e rápida de VEs. Aumentar os investimentos em infraestrutura de recarga é fundamental para promover a adoção de VEs (ADUAMA; AL-SUMAITI; AL-HOSANI, 2023). Estruturas de recargas rápidas vêm sendo instaladas em rotas para recargas para uso em deslocamentos longos. No mundo, somando estações de recargas da China, Estados Unidos, França, Holanda, Alemanha, Reino Unido e Coreia do Sul, somam um total de 531.000 carregadores rápidos (IEA, 2023).

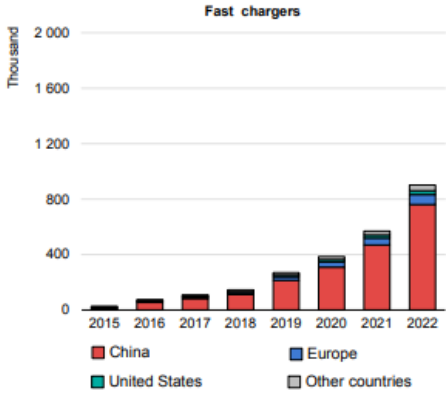


Figura 2 – Inserção Carregadores Rápidos

Fonte: (IEA, 2023).

Um dos pontos adicionais que requer bastante atenção com relação a expansão da adoção de VEs é o desenvolvimento das baterias. Atualmente, as baterias mais empregadas em VEs são construídas a partir de baterias de íons lítio e bateria de níquel-hidreto metálico, cabendo destacar que, o preço de baterias de íons lítio vem decrescendo, em conjunto com a projeção do uso em larga escala desse modelo de bateria (KUMAR; PRASAD, 2018).

Integração com Energia Renováveis

A implementação de VEs não apenas contribui para a redução das emissões, mas também fortalece a rede, e pode promover estabilidade e ainda incentivar a integração de fontes renováveis no sistema de energia. A introdução inteligente de VEs oferece inúmeras vantagens para a rede, capacitando-a a incorporar de maneira eficiente energias renováveis intermitentes (PARMAR; PATEL, 2020). Ainda assim, é bastante difícil sincronizar o carregamento de VEs com outros tipos de demanda da rede (AL-GHAILI et al., 2022).

Um dos tópicos com bastante atenção na literatura, para promover a substituição aos veículos movidos a combustíveis fósseis, estão utilizando algoritmos de otimização. As operações são empregadas para integrar a geração de energia renovável, como solar e eólica, a fim de eficientizar os processos de carregamento de VEs. Os principais objetivos são reduzir o impacto na rede elétrica e maximizar a utilização de fontes de energia renováveis. Para reduzir emissões é necessário avaliar de forma eficiente a integração de VEs com energia renováveis, isso depende consideravelmente de métodos de análise da integração, como análises estatísticas, métricas de performance, análises de comparação, custo-benefício, impacto ambiental, métricas de avaliação da experiência do usuário, e análise de sensibilidade (MAHADIK; GUCHHAIT, 2023). Em Agrawal et al. (2022) os autores consideram um modelo Fuzzy de otimização para diminuir perdas ativas e reativas da rede, com a integração de VEs, geração distribuída e sistema de armazenamento de energia, tendo como melhor resultado o caso em uso de um modelo híbrido, com baterias e VEs, obtendo um melhor perfil de tensão e menores perdas ativas e reativas (AGRAWAL et al., 2022).

Em Manousakis et al. (2023) os autores realizaram uma revisão abrangente de artigos relacionados à integração de geração de energias renováveis, ressaltados tópicos que necessitam futuras investigações nesta integração. Com o aumento da demanda de energia torna-se essencial efetuar investimento na infraestrutura da rede, também a insuficiência de estruturas de recargas que tendem a ter um alto custo de investimento, ainda é necessário o desenvolvimento de sistemas inteligentes para administração de energia, bem como aprimorar a resiliência e adaptação dos sistemas de energia implementando preço dinâmico, e por fim formas para gerenciar picos demanda (MANOUSAKIS et al., 2023).

Para suavização de picos e no preenchimento de vales na carga da rede, a energia eólica demonstra limitações, porém é possível atenuar este problema por meio de carregamento e descarregamento inteligente de VEs. Isso confirma que VEs podem e devem desempenhar um papel importante em manter o equilíbrio entre oferta e a demanda da rede elétrica, atenuando e mitigando o impacto negativo da incerteza associada à geração de energia eólica no sistema de energia (ZHAO et al., 2022).

A integração de VEs em estações de recarga inteligentes, conhecidas como Sistemas de Carregamento de Veículos Elétricos Inteligentes pode potencialmente aprimorar a qualidade da energia fornecida aos consumidores por meio da rede de distribuição. O

objetivo econômico é proporcionar incentivos financeiros para agregadores e proprietários de VEs, visando a redução do custo total de carregamento, ainda a eficiente operação da rede é o objetivo técnico central, contribuindo assim para a otimização global do sistema elétrico (GOVARDHAN; ATKAR, 2022).

Perfis de Geração Renovável e Carga do Sistema Interligado Nacional Brasileiro

Para compreensão do problema, é necessário ter conhecimento sobre os perfis de geração diário das fontes de energia renováveis intermitentes. Nas próximas etapas, este trabalho irá analisar a curva de geração solar, eólica e hidrelétrica, bem como a carga do sistema do dia 10/01/2024 do Sistema Interligado Nacional (SIN) para fim de interpretação da sua intermitência e necessidades.

Geração solar é a fonte de energia que está em expansão nos últimos anos, como se espera, o pico de geração de energia direta do sol, como a energia fotovoltaica, é em torno do meio-dia, diariamente, dependendo de níveis de irradiação solar. Já a geração eólica depende do vento e do local de instalação, e a energia hidrelétrica proveniente do fluxo de rios. Desta forma, observando os perfis de carga da Figura 3, a diferença entre as curvas demonstra a necessidade de controle da demanda.

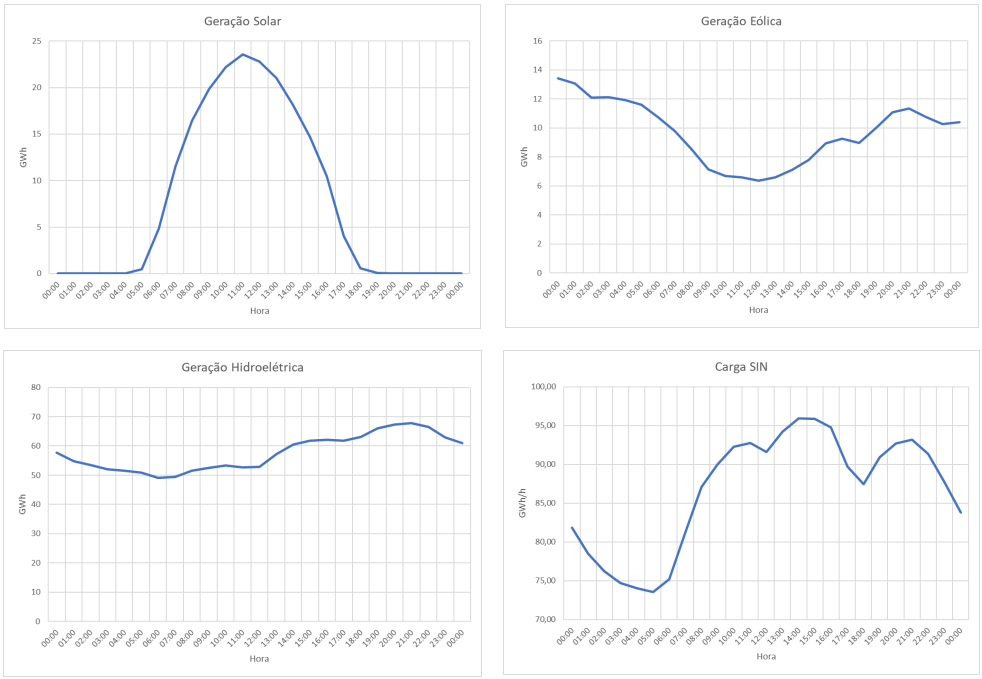


Figura 3 – Geração Renovável e Carga do SIN

Fonte: (ONS, 2024)

Resposta a Demanda

Os sistemas de potência não foram projetados para esse tipo de novas cargas, o impacto causado pelas novas cargas de VEs não podem ser negligenciados (MAHADIK; GUCHHAIT, 2023). Resposta a demanda é importante na redução de pico e deslocamento de cargas com a grande potência requisitada que se espera de veículos *plug-in* e puramente elétricos. Não é difícil perceber e alertar que o carregamento descoordenado de VEs pode ser crítico para a rede de energia (LIN et al., 2023).

A introdução de VEs, por vezes, é discutida como solução para redes de distribuições 'fracas'. Porém, sem a adoção inteligente, os VEs estão longe de serem um agente estabilizante e tendem a levar redes a instabilidade. Em vez de suportar redes, é comum controles de carregadores se desconectarem da rede e pararem recargas em redes com infraestrutura deficiente ou outras condições, como tensão baixa. Então, a impedância da rede pode levar a variações na tensão nos pontos de acoplamento, em resposta a correntes de recarga. O efeito desestabilizador da tecnologia centrada em baterias com o comportamento de potência constante é bem conhecido dos carregadores de VEs, podendo ser crítico quando os carregadores alcançarem uma carga significativa na rede. Ainda, a introdução de mais carregadores rápidos, leva ao aumento na presença de componentes eletrônicos na rede, o que leva a uma redução na inércia total do sistema, então a alocação de infraestrutura de recargas e seções de agendamento de recargas devem seguir um caminho estratégico (RIVERA et al., 2023).

Em Schill e Gerbaulet (2015), foram comparados dois métodos de avaliação de modos de recarga e avaliam o despacho de sistemas de energia, com relação a recargas de VEs, sendo os modos de recargas descritos como *user-driven* ou *cost-driven*, controlando a potência entregue em virtude do SOC. Foi concluído que, um pequeno relaxamento em modo inteiro de *user-driven*, configura perfis de curva de carregamento mais suaves. A carga de pico do sistema pode ser substancialmente reduzida se os condutores dos veículos concordassem em não carregar toda a capacidade da bateria o mais rápido possível, após a conexão à rede, mas apenas uma fração dela (SCHILL; GERBAULET, 2015).

Em Lin et al. (2023), foram comparadas técnicas de resposta à demanda, os autores comparam estratégias de carregamento de VEs, como trocas de bateria e estratégias com Sistema de Armazenamento de Energia por Bateria (do inglês *Battery Energy Storage System* – BESS), com o objetivo de minimizar custos. Conclui que adicionando estratégias de trocas de baterias de VEs durante o dia tem uma boa flexibilidade e pode promover estabilidade para cargas na rede, evitando efeito avalanche. Ainda, a proposta demonstra redução no custo de energia, também atenuando a dependência da rede e diminuindo a dependência de comunidades de energia terem BESS associados (LIN et al., 2023).

CONCLUSÃO

Nos sistemas de energia, novas cargas têm a tendência de se integrar à carga já existente. As recargas rápidas de VEs emergem como uma carga com considerável aumento de demanda nos próximos anos, tornando-se parte significativa do planejamento de expansão do sistema de energia, impactando sistemas de transmissão, distribuição e geração de energia. Será necessário implementação de tecnologias inteligentes para gerenciar eficientemente a demanda, garantindo a estabilidade e confiabilidade do fornecimento de energia.

Para tanto, é fundamental disponibilizar aos tomadores de decisão trabalhos que compreendam o perfil de carregamento rápido de veículos elétricos, utilizando dados reais de utilização e desse novo padrão de carga, para que novas estruturas do sistema de potência sejam alocadas de maneira inteligente, e o gerenciamento da carga seja realizada de modo eficaz.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio técnico e financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS, e Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Instituições Brasileiras.

REFERÊNCIAS

ADUAMA, P.; AL-SUMAITI, A. S.; AL-HOSANI, K. H. Electric Vehicle Charging Infrastructure and Energy Resources: A Review. **Energies**, v. 16, n. 4, 2023. D.O.I.:10.3390/en16041965

AGRAWAL, H. et al. A Fuzzy-Genetic-Based Integration of Renewable Energy Sources and E-Vehicles. **Energies**, v. 15, n. 9, 2022. D.O.I.:10.3390/en15093300

AL-GHAILI, A. M. et al. Can electric vehicles be an alternative for traditional fossil-fuel cars with the help of renewable energy sources towards energy sustainability achievement? **Energy Informatics**, v. 5, n. 4, p. 60, 2022. D.O.I.:10.1186/s42162-022-00234-3

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO (ABVE). **Os oito meses que mudaram a eletromobilidade**. Disponível em: <http://www.abve.org.br/oito-meses-que-mudaram-o-mercado-de-eletromobilidade/>. Acesso em: 12 nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAFEA). **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2023/05/anuario-ATUALIZADO-2023-ALTA_compressed.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2023.

BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social**, p. 207–224, 2011.

BOMMANA, B. et al. A Comprehensive Examination of the Protocols, Technologies, and Safety Requirements for Electric Vehicle Charging Infrastructure. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2023, p. 7500151, 2023. D.O.I.:10.1155/2023/7500151

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Caderno de Eletromobilidade do PDE 2032**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/mme-e-epe-publicam-novo-caderno-do-pde-2032-eletromobilidade>. Acesso em: 12 nov. 2023.

FERREIRA, J. P.; DIAS, M. J. Veículos Elétricos e Híbridos: História e Perspectivas para o Brasil. **Revista Processos Químicos**, v. 14, n. 28, p. 139–147, abr. 2021. D.O.I.:10.19142/rpq.v14i28.610

GOVARDHAN, S.; ATKAR, R. S. **A Review on Electric Vehicle Charging System based on the Renewable Energy**. 2022 4th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA). **Anais**... 2022

IEA. **Global EV Outlook 2023**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>. Acesso em: 1 fev. 2024.

KUMAR, A.; PRASAD, L. B. **Issues, Challenges and Future Prospects of Electric Vehicles: A Review**. 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON). **Anais**... 2018

LIN, J. et al. Aggregate demand response strategies for smart communities with battery-charging/switching electric vehicles. **Journal of Energy Storage**, v. 58, p. 106413, 2023. D.O.I.:https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106413

LOGTENBERG, R.; PAWLEY, J.; SAXIFRAGE, B. **Comparing Fuel and Maintenance Costs of Electric and Gas Powered Vehiclesin Canada**. Disponível em: <https://www.2degreesinstitute.org/reports/comparing_fuel_and_maintenance_costs_of_electric_and_gas_powered_vehicles_in_canada.pdf>. Acesso em: 30 out. 2023.

MAHADIK, S.; GUCHHAIT, DR. P. K. **Efficient integration of renewable energy for Electric Vehicle Charging: A hybrid system approach**. **International Journal of Scientific Research in Science and Technology**, jun. 2023. Disponível em: <https://ijsrst.com/IJSRST523103151

MANOUSAKIS, N. M. et al. Integration of Renewable Energy and Electric Vehicles in Power Systems: A Review. **Processes**, v. 11, n. 5, 2023. D.O.I.:10.3390/pr11051544

ONS. **Histórico da Operação Dados Gerais**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados-gerais>. Acesso em: 1 fev. 2024.

PARMAR, S.; PATEL, M. A REVIEW ON RENEWABLE ENERGY INTEGRATION FOR ELECTRIC VEHICLES. **International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology**, v. 5, n. 8, dez. 2020. D.O.I.:10.33564/ijeast.2020.v05i08.038

RIVERA, S. et al. Charging Infrastructure and Grid Integration for Electromobility. **Proceedings of the IEEE**, v. 111, n. 4, p. 371–396, 2023. D.O.I.:10.1109/JPROC.2022.3216362

SCHILL, W.-P.; GERBAULET, C. Power system impacts of electric vehicles in Germany: Charging with coal or renewables? **Applied Energy**, v. 156, p. 185–196, 2015. D.O.I.:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.012

TAYYAB, M. et al. **New sizing methodology of energy storage and PV systems for electric vehicle charging stations considering voltage compensation in a low voltage grid**. NEIS 2021; Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems. **Anais**... 2021

TENG, F. et al. Technical Review on Advanced Approaches for Electric Vehicle Charging Demand Management, Part I: Applications in Electric Power Market and Renewable Energy Integration. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 56, n. 5, p. 5684–5694, 2020. D.O.I.:10.1109/TIA.2020.2993991

CAPÍTULO 11

ANÁLISE DE VAZAMENTO ATRAVÉS DO MEDIDOR ULTRASSÔNICO DIGITAL: ECONOMIA DE ÁGUA ATRAVÉS DO HIDRÔMETRO

Data de aceite: 01/04/2024

Marcos Roberto Ananias
Engenheiro de Automação, Professor e Perito Ambiental da P.M.S.B.C.

RESUMO: O artigo científico tem como objetivo a análise, a identificação e a economia de água moderna. Seus identificadores e parâmetros digitais serão apresentados como um modelo de solução pioneiro. O hidrômetro ultrassônico e sua análise de campo, a ser utilizado por qualquer área, instituição ou pessoa. As soluções e aplicações estão voltadas desde a engenharia de controle, até a administradores e gestores. Na plena convicção, que são ferramentas de apoio ao planejamento estratégico e a gestão ambiental pública e privada.
PALAVRAS-CHAVE: Economia de água 1. Hidrômetro 2. Solução 3. Planejamento estratégico 4.

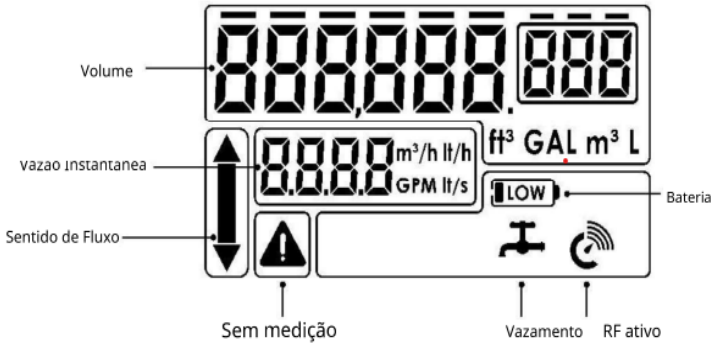
LEAK ANALYSIS USING DIGITAL ULTRASONIC METER: WATER SAVING THROUGH THE HYDROMETER

ABSTRACT: The scientific article aims to analyze, identify and save modern water. Its digital identifiers and parameters will be presented as a pioneering solution model. The ultrasonic hydrometer and its field research, to be used by any area, institution or person. The solutions and applications are aimed at control engineering, administrators and managers. In full conviction, they are tools to support strategic planning and public and private environmental management**.**
KEYWORDS: Water saving 1. Hydrometer 2. Solution 3. Strategic planning 4.

INTRODUÇÃO

A leitura apurada do hidrômetro digital ultrassônico é uma ferramenta importantíssima na economia de água. Medidores de vazão ultrassônicos (DOPPLER, 1842) são dispositivos não intrusivos que utilizam vibrações acústicas para medir a vazão de determinado líquido. A pesquisa de campo revela o comportamento de cada próprio público

em relação ao seu sistema de distribuição de água. Sua vazão (m^3/h), volume (m^3), tempo por ciclo (h), a rádio frequência ativa ou inativa, se há ou não vazamento (indicação visual/ ou cálculo), o sentido do fluxo de água (para cima/para baixo), a vazão instantânea, se há medição; ou se por algum motivo, o hidrômetro encontra-se parado ou danificado (avaliação visual).



Fonte: ARAD Waters Measuring Technologies (b2018)

As maiores dificuldades encontradas na pesquisa de campo são realmente, a identificação de **variáveis que dificultam** a análise precisa do vazamento. São elas: consumo diário/mensal de água ocasional, área total do estabelecimento, números de pessoas que transitam diariamente (permanentes e ocasionais), equipamentos operantes que utilizem água na localidade, hidrômetro com defeito e se o reservatório está completo ou recebendo água no exato momento da vistoria.

Em contrapartida, anulando-se as variáveis; o hidrômetro digital ultrassônico é capaz de avaliar o sistema de abastecimento interno em vibrações de som, que captadas se traduzem em informações automatizadas de gerenciamento e até transmiti-las via IOT a um equipamento, a um software apropriado, ou até a um celular para complemento técnico e gráfico.

IDENTIFICAÇÃO DE VAZAMENTO E ECONOMIA DE ÁGUA

> "O governo e a sociedade não sabem regra geral, quanto custam os serviços públicos" (ALONSO, 1999).

O procedimento básico é sugerido pelo próprio hidrômetro ultrassônico, na identificação digital do visor.

No segundo ponto da análise, o aparelho identifica e detecta o volume do vazamento. Se considerarmos a fórmula de cálculo de vazão:

Vazão (l/s) = volume (l)/tempo(s) desta forma, transformando em metros cúbicos por hora teremos: 1000 litros = 1 m^3 desta forma, vazão (m^3/h) = volume (m^3) x tempo (h = 3600s), logo: V= v*1000 litros/tempo 1/3600s onde: V= vazão, v = volume e o t = tempo. Simplificando obtemos: V(m^3/h) = 3,6*volume (l)/tempo(s).

Estudo de Caso 1

Em uma escola encontra-se a vazão de 0,500 m³/h no hidrômetro sem a influência das variáveis pode-se indicar vazamento na unidade.

A análise de campo constatou 50 litros de água em 6 minutos para uma vazão de

0,500m³/h. Se o reservatório não se encontra em enchimento no momento da vistoria, se não há máquinas em atividade, e ninguém tomando banho ou porventura no uso coletivo e simultâneo do banheiro, não se tem fundamento lógico para que 500 litros de água em 1 hora se percam, em um estabelecimento devidamente comprovado pelo seu medidor ultrassônico, a menos que temos um vazamento a encontrá-lo.

Se o cálculo seguir em 1 hora temos:

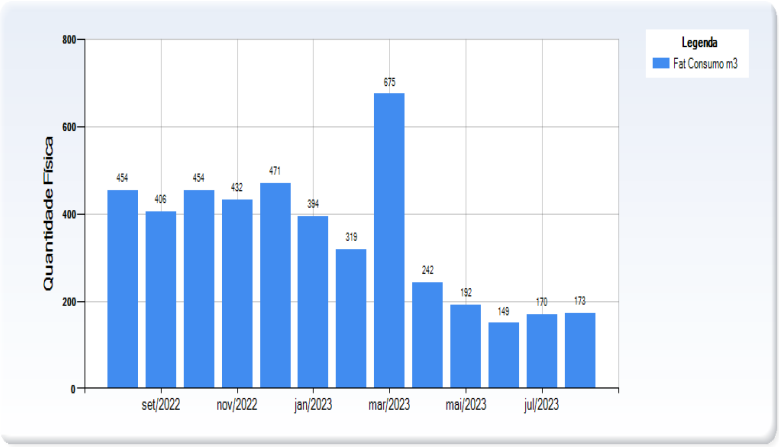
50 litros 6 minutos = 500 l/h x 1 dia(24h) = **12m³/dia**

X 1 h

Conclui-se: **Perda de 12 m³/dia**.

Estudo de Caso 2: EMEB Professora Pedra de Carvalho

A primeira vistoria em março de 2023 apontava um consumo 675 m³/mês na unidade, sem indicação de vazamento pelo hidrômetro. Já em agosto de 2023, avalia-se um consumo de 173 m³/h, ou seja, uma redução equivalente a cerca de R$ 21.170,00 ao mês.



Notas: O gráfico abrange dados de consumo(m³) de agosto de 2022 a agosto de 2023.

Gráfico 1 — Dados de consumo – EMEB Pedra de Carvalho – 2022-2023

Fonte: Gestão Net (2023)

Notas: Todos os hidrômetros analisados neste artigo são de posse da SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo).

Foto 1 — Hidrômetro – EMEB Pedra de Carvalho – 2022-2023

Fonte: P.M.S.B.C/EMEB Prof.ª Pedra de Carvalho (2023)

Em vistoria, foi feito a análise de vazão com aproximadamente 50 litros captados em cerca de 149,6 segundos. Descartando-se as variáveis e sem o apontamento de vazamento no visor do hidrômetro (torneira), o alto consumo vem fundamentado pelo volume e pela análise de campo. A pergunta básica é: Como gastar 200 litros de água em cerca de dez minutos? É claro que não estamos falando do consumo normal, mas de um consumo anormal, ou seja, **vazamento**.

Em um cálculo técnico, já que a escola possui cerca de 400 alunos mais funcionários, dois reservatórios, e um extenso perímetro; e o índice (YWASHIMA, 2005) em torno de 180 m³/mês será o ideal.

Aplicando-se o cálculo de vazão:

Q = v/t Q = Vazão

1200 m³/h = v/1h v = volume

v = 1200 m³ t = tempo

Nota-se que a perda aproximada deve ser considerada sem as variáveis previstas.

Desta forma incluindo as variáveis a base do cálculo se alterará. Se 1200 m³ x 24(horas) x 30 (dias) = **864 m³/mês**. É claro que temos consumo e perdas inclusas.

Conclui-se: **Perda de 864 m³/mês.**

> Em consulta ao gráfico (pág. 4) em março de 2023, o índice de consumo registrado é 675 m³. Tenho que reforçar que o volume encontrado em março, é correspondente de fevereiro até abril se considerarmos a conta de água, tendo normalidade apenas em maio de 2023.

A influência direta das variáveis no processo de identificação

Todo processo pode ser comprometido na identificação do vazamento, se o engenheiro, tecnólogo ou gestor, não seguir os procedimentos. As variáveis do processo e de causa humana devem ser identificadas e corrigidas.

As inconsistências do processo já foram anteriormente citadas na (pag. 2) e devem ser rigorosamente observadas.

Já quanto as variáveis humanas devem-se considerar:

Os erros matemáticos e a análise incorreta do operador. É claro que, o foco deste artigo é a identificação primária do vazamento, tendo a identificação secundária um outro papel, a de geofonamento, manutenção e solução do vazamento. São duas etapas distintas; mas que são de suma importância para se chegar ao êxito em relação à economia e o uso racional da água para qualquer gestão pública.

Economia de água

Economizar é um dos objetivos para qualquer gestão eficiente. O desperdício é o maior inimigo de uma boa administração.

A água é um recurso escasso na região metropolitana de São Paulo, por isso é fundamental sua aplicação com racionalidade. A dificuldade é demonstrar a administradores e gestores a diferença entre o uso consciente da água e o desperdício.

Listamos algumas unidades **antes e depois da análise de vazamento** através do medidor digital ultrassônico e da **economia gerada** nestes casos, além da contribuição ao PURA (Programa de Uso Racional da Água) e a Prefeitura Municipal de São Bernardo do Campo.

LOCAL	ANTES	DEPOIS	MÉDIA	META	ECONOMIA
Centro de Zoonoses	737	396	628	579	R$ 13.807,91/mês
EMEB Prof. Paulo T	313	123	206	177	R$ 7.440,05/mês
EMEB Profª Ermínia	329	147	206	185	R$ 7.102,68/mês
Parque S. Arena	1808	938	1314	1229	R$ 36.116,53/mês
EMEB Pedra de C.	675	149	271	214	R$ 21.609,60/mês
40º Batalhão Polícia	851	59	266	248	R$ 32.827,17/mês
Amostragem = 6	**m³**	**m³**	**m³**	**m³**	**Total = R$ 118.903,94**

Notas: A tabela abrange dados de consumo (m³) e a economia (R$) em concordância aproximada com a base de cálculo das contas de água da SABESP, sendo expandida aos meses consecutivos. A média (m³) é relativa aos índices de consumo dos 12 meses 2023. E a meta é determinada pelo contrato do PURA (Programa de Uso Racional da Água) celebrado entre a SABESP e a Prefeitura Municipal de São Bernardo do Campo.

Tabela 1 — Dados de consumo e economia –P.M.S.B.C.– 2023

Fonte: Gestão Net (2023) /SABESP- PURA (2024)

A economia gerada pelas **intervenções pontuais** é com certeza na casa dos **milhões de reais.** É exatamente por isso, que destacamos esse artigo e sua significativa importância para a sociedade.

CONCLUSÃO

A análise de vazamento através do medidor ultrassônico digital, visa a economia financeira da gestão de água e o cuidado para com o uso de recursos naturais ambientais que nos rodeiam. Um estudo mais cauteloso neste artigo, transformará absolutamente sua visão para com a engenharia de controle aliado à tecnologia de resultados.

A identificação, a vazão coletada, os cálculos e um processo enxuto de variáveis são o caminho para uma economia significativa e de grandes resultados.

AGRADECIMENTOS

Ao ilustre prefeito de São Bernardo do Campo, Orlando Morando Junior; à Secretaria de Obras e Planejamento Estratégico (SOPE) representados pelos secretários Luciano Eber e Mauro Valeri, ao Diretor do Departamento de Concessionárias (SOPE-4) Hedmilton Ensinas e a toda equipe do P.U.R.A. representados pelo Tecnólogo Antônio Sérgio Mendonça, que contribuíram efetivamente para com esta obra.

REFERÊNCIAS

ALONSO, M. Custos no serviço público, Revista do Serviço Público, Ano 50, n. 1, p. 59-63, 1999.

CETESB, São Paulo. Água, Lixo e Meio Ambiente, 2ª edição. São Paulo, CETESB, 1988.

_____. CONAUT. Disponível em: <https://conaut.com.br/arad/ Acesso em: 06 jan. 2024.

COSTA, F. J. L. da. Estratégias de Gerenciamento de Recursos Hídricos no Brasil: Áreas de Cooperação com o Banco Mundial, 1ª edição, Brasília,2003.

_____. GESTÃO NET. Disponível em: <https://gestaonet/default.aspx/ Acesso em: 08 jan. 2024.

IWASHIMA, L. Avaliação do uso da água em edifícios escolares públicos e análise de viabilidade econômica da instalação de tecnologias economizadoras nos pontos de consumo. Faculdade de Engenharia Civil, arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005.

_____. SABESP. Disponível em: <https://sabesp.com.br/site/ Acesso em: 05 jan. 2024.

_____. UNICAMP. Disponível em: <https://histedbr.fe.unicamp.br/navegando/glossario/christian-johann-doppler/ Acesso em: jan. 2024.

_____. PREFEITURA DE SÃO BERNARDO DO CAMPO. Disponível em: <https://saobernardo.sp.gov.br/web/sbc/plano-municipal-de-saneamento-basico/ Acesso em: 02/02/2024

CAPÍTULO 12

LA DESCONTAMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES UTILIZANDO ZEOLITA, COMO SOLUCIÓN DE DESARROLLO LOCAL

Data de aceite: 01/04/2024

Maria Shirlendy Guerrero Alcivar
Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Universidad Técnica de Manabí
Portoviejo, Manabí, Ecuador
MsC. Ingeniería Ambiental
http://orcid.org/0000-0002-3404-5413

Olinda Elizabeth Caicedo Arévalo
Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Universidad Técnica de Manabí
MsC. Ingeniería Ambiental
http://orcid.org/0000-0001-7032-2273

Lucia Katherine Macias Sánchez
Carrera de Ingeniería Construcciones Civiles y Arquitectura de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Universidad Técnica de Manabí
MsC. En Geotecnia
https://orcid.org/0000-0002-9921-4943

Peter Joshue Navarrete Guerrero
Jefe de la unidad de planificación y prevención contra incendios, Cuerpo de Bomberos del cantón Esmeraldas
Arquitecto
https://orcid.org/0009-0009-1037-6443

Marjory Elizabeth Caballero Mendoza
MsC Magister en Ingeniería Civil
Construcciones Civiles y Arquitectura de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la Universidad Técnica de Manabí
https://orcid.org/0000-0002-7377-554X

Bolívar Humberto Ortega Bravo
MsC Arquitectura del Paisaje
Construcciones Civiles y Arquitectura de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la Universidad Técnica de Manabí
https://orcid.org/0000-0002-1805-8732

María Veneranda Pita Mera
MsC. Arquitectura, Mención Proyectos Arquitectónicos
Construcciones Civiles y Arquitectura de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la Universidad Técnica de Manabí
https://orcid.org/0000-0002-4480-4567

María Belén Lozano Molina
MsC. Arquitectura, Mención Proyectos Arquitectónicos y urbanos
Construcciones Civiles y Arquitectura de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la Universidad Técnica de Manabí
https://orcid.org/0000-0002-5470-8827

Luzmila Elizabeth Burbano Mera
MsC. Procesamiento de Alimentos, Ingeniera Agroindustrial,
Departamento de Industrial, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la Universidad Técnica de Manabí
https://orcid.org/0000-0002-6306-5528

Galo Arturo Perero Espinoza
MsC. Administración Ambiental
Departamento de Industrial, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la Universidad Técnica de Manabí
http://orcid.org/0000-0002-3164-6264

RESUMEN: Existe en la actualidad un mal manejo de las cuencas hidrográficas, esto ha provocado que cada día disminuya la calidad de agua potable. La contaminación de los acuíferos constituye un problema para la humanidad. En muchos lugares estas aguas son vertidas directamente a ríos, arroyos, lagos o mares antes de ser tratadas adecuadamente, resultando que se introduzcan elementos de contaminación que, acaben produciendo importantes daños ecológicos en el entorno ambiental y enfermedades de salud pública (causadas por virus y bacterias) en las personas y comunidades que entren en contacto con esas aguas contaminadas. El objetivo fue investigar si la zeolita puede servir para disminuir la contaminación con amonio de las aguas del río Portoviejo, mediante el aprovechamiento de recursos locales, se utilizó una metodología sencilla que puede ser aplicada directamente en las fuentes de contaminación, mediante la participación de los factores sociales comunitarios, donde se demuestra que hay materiales como la zeolita que puede ser utilizada como elemento purificador de las aguas residuales que se descargan al río, logrando con ello la reducción de la contaminación mediante el mejoramiento de los parámetros físicos-químicos asociados con la calidad del agua, en función de lo estipulado en la normativa ecuatoriana. Se tuvo como resultado que la zeolita presenta las características físico químicas adecuadas para ser utilizadas como material para descontaminar las aguas residuales de los afluentes del Río Portoviejo.
Palabra claves: Zeolita; contaminación ambiental; aguas residuales; amonio; nitrito.

WASTEWATER DECONTAMINATION USING ZEOLITE, AS A LOCAL DEVELOPMENT SOLUTION

ABSTRACT: Currently, there is poor management of river basins, which is causing the quality of drinking water to decrease every day. Water pollution is a problem for humanity. In many places, these waters are discharged directly into rivers, streams, lakes, or seas before being adequately treated, introducing pollution elements that end up causing significant ecological damage to the environment and public health diseases (caused by viruses and bacteria). on the people and communities that come into contact with these contaminated waters. The objective was to investigate whether zeolite could be used to reduce ammonium pollution in the waters of the Portoviejo River, through the use of local resources, using a simple methodology that could be applied directly to the sources of pollution, through the

participation of community social factors. . , which demonstrates that there are materials such as zeolite that can be used as a purifying element for wastewater discharged into the river, thereby achieving the reduction of pollution through the improvement of the physical-chemical parameters associated with the quality of the water, depending of what is found. stipulated in Ecuadorian regulations. As a result, the zeolite presents suitable physical and chemical characteristics to be used as a material to decontaminate wastewater from tributaries of the Portoviejo River.
KEYWORDs: Zeolite; environmental pollution; sewage water; ammonium; nitrite

INTRODUCCIÓN

La contaminación de las fuentes de agua constituye un grave problema que enfrenta la humanidad en la actualidad. Los recursos naturales resultan insuficientes si se continúa con las políticas actuales de desarrollo y consumo. Esta situación provoca efectos colaterales como la sobre explotación de acuíferos, que unido a los problemas de contaminación de las cuencas hídricas, reduce la disponibilidad del agua para ser utilizada en los servicios públicos y la producción de bienes materiales, por lo que resulta necesario tomar medidas que permitan reducir la contaminación ambiental (Velázquez, 2023), (Rodríguez, Vázquez, & Millet, 2017), también influye la explosión demográfica y los altos costos de las instalaciones para lograr un buen tratamiento (Cárdenas É. P., 2022).

En el mundo existe un significativo déficit de tratamiento de las aguas residuales; en el informe del 2023 de la UNESCO, se plantea el riesgo inminente de una crisis mundial del agua donde existe más de 2.000 millones de personas (26% de la población mundial) no disponen de agua potable y 3.600 millones (el 46%) carecen de acceso a un saneamiento gestionado de forma segura, o simplemente no lo tenían, una de las causas son la creciente incidencia de sequías extremas y prolongadas también está estresando los ecosistemas (UNESCO, 2023)

Según estudios realizados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), se estima que mundialmente se esté realizando un uso extensivo de aguas residuales; el 10% de la población mundial consume alimentos regados con aguas residuales; 20 millones de hectáreas en 50 países son regadas con agua residual cruda o parcialmente tratada; el uso de agua gris creciendo en países desarrollados y en desarrollo y para América Latina se estableció la cifra de 118 294 910 de población sin saneamiento (Silva 2016).

Las aguas contaminadas no sólo afectan a los habitantes del lugar, sino que, escurriendo tanto por los arroyos como por el subsuelo, vuelcan en la ribera de los ríos sus impurezas, ampliando el área de contaminación y afectando esta importante fuente de agua dulce, esta también forma parte crucial de la adaptación al cambio climático, y es un decisivo vínculo entre la sociedad y el medioambiente (ONU, 2023).

Una de las alternativas que se puede aplicar para minimizar el problema, es el tratamiento de aguas residuales con métodos ambientales que permitan reusar el agua recuperando los parámetros de calidad establecidos y capacitando a las personas en el uso correcto del agua y su protección (Castro & Moncada, 2022).

El tratamiento de aguas por el proceso de intercambio iónico conlleva a la necesidad de establecer las condiciones de operación más adecuadas (pH, tipo de resina, tiempo de contacto, etc.) para la remoción del contaminante clave.

La Universidad Técnica de Manabí ha desarrollado estudios encaminados a lograr el empleo de la zeolita como material de construcción y para la remoción de amonios en aguas residuales, con lo cual se logra ahorrar recursos económicos, al propio tiempo que se propicia el aprovechamiento de un mineral que se encuentra disponible en la región costera del Ecuador.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la caracterización del agua residual se emplearon tanto métodos de análisis cuantitativos, para la determinación precisa de la composición química del agua residual, como análisis cualitativos para el conocimiento de las características físicas y biológicas. Para la determinación del índice de calidad del agua se utilizó la norma ecuatoriana de calidad y descarga de efluentes, contenida en el Libro IV/2010, del Ecuador (Aamblea Nacinal Legislativa, 2023).

DISEÑO DE EXPERIMENTO

Se utilizaron cinco filtros experimentales construidos con recursos propios, diseñados para trabajar con zeolita particulada de cuatro dimensiones como material filtrante, con el objetivo de realizar el filtrado de las muestras de agua residual recogidas.

Las aguas residuales, son aquellas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado (Gómez, 2015).

Más que el conocimiento químico exacto de la composición de las aguas residuales urbanas, tres son las características más importantes que se deben destacar, desde un punto de vista sanitario y en relación con el tratamiento (Espigares & Pérez, 2015).

- La gran cantidad de sólidos presentes.
- La abundancia de sustancias biodegradables.
- La presencia de un gran número de microorganismos.

Como se ha relacionado anteriormente, en las aguas residuales están contenidas una serie de sustancias que pueden ser utilizadas como alimento por los microorganismos presentes, siendo eliminadas de esta forma de las aguas residuales, denominándose por esta razón biodegradable.

La nutrición de los microorganismos se hace a expensas, no sólo de los sustratos solubles, sino también de los sustratos particulados e insolubles, ya que estos son adsorbidos en las superficies bacterianas, dónde son atacados por exoenzimas (esterasas, carbohidrasas, proteasas, etc.), disminuyendo su tamaño hasta el nivel molecular.

Las aguas residuales pueden ser clasificadas según su origen en la figura 1 se muestra su clasificación.

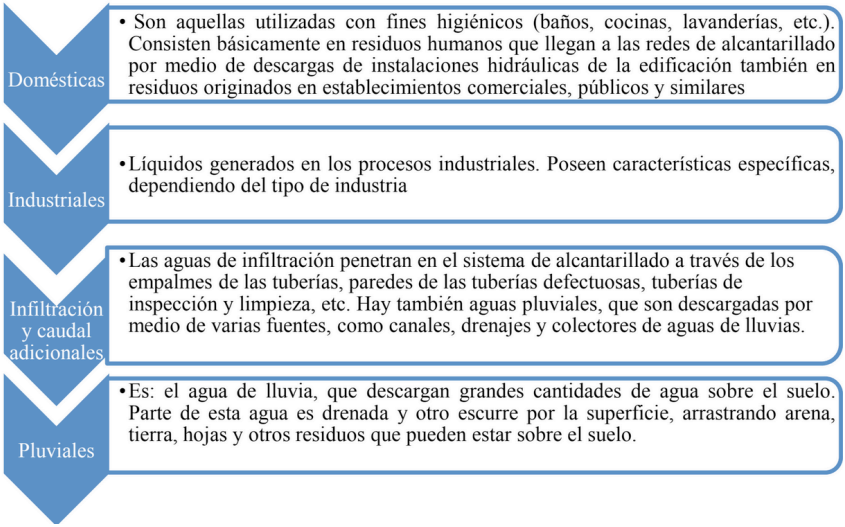


Figura 1. Clasificación de las aguas residuales

Fuente: (Castro & Moncada Rangel, 2022)

LA CONTAMINACIÓN DERIVADA DE LAS AGUAS RESIDUALES

La contaminación por aguas residuales en la zona costera debe tomarse como una alarma histórica. Desde la Agenda de Estocolmo ya se había advertido sobre el problema de las aguas municipales. En la cumbre de Río (1992) se dijo que en el 2005 habría que intentar disminuirlas a un 50%, pero esto ha sido imposible de lograr (CEPAL, 2019).

El manejo inadecuado de las aguas residuales puede tener consecuencias muy graves para la salud humana, el medio ambiente y el desarrollo económico. Las aguas residuales no tratadas constituyen un potencial contaminador de las fuentes de suministro, lo que aumenta el riesgo de enfermedades infecciosas, el deterioro del agua subterránea y de otros ecosistemas locales.

Los principales impactos ambientales dan como resultado un aumento significativo de la mortalidad, debido a enfermedades como el cólera, parasitosis, entre otros, que son prevenibles. Los proyectos de tratamiento de aguas residuales son ejecutados a fin de evitar o aliviar los efectos de los contaminantes que estas contienen. Cuando estos proyectos son ejecutados correctamente, su impacto total sobre el ambiente es positivo.

Las aguas contaminadas no sólo afectan a los habitantes del lugar, sino que, escurriendo tanto por los arroyos como por el subsuelo, vuelcan la contaminación en la ribera de los ríos, ampliando el área contaminada y afectando las reservas de agua dulce (Bofill, y otros, 2005).

En el año 2013 la Organización Mundial de la Salud (OMS) afirmó que, aproximadamente el 90% de todas las aguas residuales en los países en desarrollo, se descargan sin tratamiento directamente a los ríos, lagos o los océanos; el uso de aguas residuales se ha incrementado y muestra de ello es que 20 millones de hectáreas en 50 países son irrigadas con aguas residuales crudas o parcialmente tratadas; se piensa que el 10% de la población del mundo consume alimentos irrigados con aguas residuales, siendo muy difícil de cuantificar la extensión de esta situación, por la naturaleza informal de su práctica (OMS, 2013). Cuando las aguas residuales de tipo doméstico son lanzadas a los ríos o cuerpos de agua sin ningún tratamiento o desinfección, suelen contaminarlos con altas concentraciones de bacterias, virus y parásitos, creándose un grave problema de salud pública. Entre las principales enfermedades que se propagan por este mal manejo de las aguas residuales están las diarreas (bacterianas y víricas), la tifoidea y la paratifoidea, el cólera, la hepatitis infecciosa, la amibiasis, giardiasis, entre otras. Como es muy difícil detectar y cuantificar a todos los patógenos causantes de estas enfermedades, los ingenieros sanitarios y muchas autoridades de salud pública utilizan como organismo indicador de la contaminación por patógenos a los coliformes fecales (Sánchez & Guangasig).

La mayoría de las industrias producen descargas de desechos líquidos que tienen demandas bioquímicas de oxígeno (DBO) muy altas, pero concentraciones de coliformes fecales menores que las de las aguas residuales domésticas, pudiéndose decir que los desechos industriales constituyen un gran problema ecológico y los desechos domésticos un gran problema de salud pública aunque ambos coadyuven en el deterioro general de la calidad del agua (OMS, 2013).

Los efectos de las aguas residuales en la zona costera dependen fundamentalmente de la conformación física de la misma. Estas características fijas del territorio parecen olvidarse cuando se trata del manejo de recursos costeros, lo que es más importante cuando se estima que la densidad de la población de las zonas costeras es grande, alcanzando más o menos 80 personas por km², es decir, 2.5 veces superior al promedio total de la que habita en los continentes, lo cual indica la tendencia que ha presentado el hombre a desplazarse hacia estas zonas por las ventajas que representa la riqueza de sus recursos.

Todas las actividades humanas que se desarrollan en la costa y en especial aquellas que involucran manejo de aguas residuales, dependen para la descarga de sus desechos, por un lado, de la posición que ocupan dentro de una cuenca hidrológica, y por otro, de las corrientes marinas donde son vertidas, esto es lo que en un momento dado definir· la dilución de estas y la mitigación de sus efectos.

EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de las aguas residuales domiciliarias debe ser entendido, como una necesidad, a fin de mantener condiciones adecuadas de salud e higiene para la población, conservar la calidad de las fuentes de agua y propender a un uso racional y sustentable de los recursos acuáticos.

En la actualidad el tratamiento adecuado de las aguas residuales constituye una preocupación de primer orden para la sociedad. El vertido de aguas residuales urbanas sin depurar ejerce sobre los cauces receptores toda una serie de efectos negativos, estudios realizados en México destacan algunas de ellas (Jacobo, 2018).

a. Aparición de fangos y flotantes que no sólo provocan un desagradable impacto visual, sino que, debido al carácter reductor de la materia orgánica, se puede llegar a provocar el agotamiento del oxígeno disuelto presente en las aguas y originar el desprendimiento de malos olores.

b. Agotamiento del contenido de oxígeno presente en las aguas. Consumido el oxígeno disponible, los procesos degradativos vía anaerobia generan olores desagradables, al liberarse gases que son los causantes de estos olores.

c. Aportes excesivos de nutrientes, causantes del crecimiento descontrolado de algas y otras plantas en los cauces receptores (eutrofización).

d. Daños a la salud pública. Entre las enfermedades que pueden propagarse destacan el tifus, cólera, disentería y hepatitis A.

Las estaciones depuradoras van a eliminar una elevada proporción de los contaminantes presentes en las aguas residuales, vertiendo efluentes depurados, que puedan ser asimilados de forma natural por los cauces receptores. Puede, por tanto, considerarse a las estaciones de tratamiento, como un complemento artificial de los procesos naturales que se dan en las masas acuáticas, al haberse sobrepasado ampliamente su capacidad de autodepuración.

De manera general el tratamiento de aguas residuales en las plantas convencionales consiste en hasta cuatro etapas que comprenden procesos químicos, físicos y biológicos (IDRICA, 2022), entre los que se encuentran los siguientes:

1. Tratamiento preliminar: destinado a la eliminación de residuos fácilmente separables y en algunos casos un proceso de pre-aireación.
2. Tratamiento primario: que comprende procesos de sedimentación y tamizado.
3. Tratamiento secundario: que comprende procesos biológicos aerobios y anaerobios y físico-químicos (floculación), para reducir la mayor parte de la DBO.
4. Tratamiento terciario o avanzado: que está dirigido a la reducción final de la DBO, metales pesados y/o contaminantes químicos específicos y la eliminación de patógenos y parásitos.

Pero la construcción de una planta de tratamiento es costosa y compromete un espacio de terreno que algunas veces no está disponible, también el costo del tratamiento de aguas residuales por los métodos convencionales puede resultar muy alto y frecuentemente los gobiernos locales no cuentan con recursos suficientes para tomar medidas atenuantes. Por lo tanto, en el proceso de elegir la tecnología de saneamiento adecuada se deben tener en cuenta alternativas eficaces y elegir la opción correcta para las circunstancias específicas.

Es cierto que en los últimos años el tratamiento de las aguas residuales se ha realizado por métodos centralizados, aplicando tecnologías masivas basadas en grandes plantas de tratamiento, que resultan costosas económica y ambientalmente y donde las localidades se limitan a jugar un papel pasivo en la gestión.

Se trata de adoptar nuevos conceptos, métodos y tecnologías de solución al problema de las aguas residuales desde el esquema de desarrollo local, donde los gobiernos autónomos descentralizados parroquiales, puedan jugar un papel de responsabilidad activa mediante la aplicación de tecnologías descentralizadas, el empleo de recursos autóctonos y la puesta en práctica de una política de desarrollo sostenible y amigable con la naturaleza.

LA ZEOLITA PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Las zeolitas son una colección de minerales no metálicos, cuyos yacimientos están limitados a no más de veinte países entre los que figura el Ecuador. Su uso ha ido ganando espacio a nivel mundial; pero aún se limita a países desarrollados del primer mundo como son: EE.UU; Alemania; Japón; Italia; y Rusia entre otros, actualmente se pretende desarrollar su empleo en el país, con algunas aplicaciones en la alimentación animal y para la purificación del agua, especialmente en la remoción de amonio y el mejoramiento de otros parámetros físicos y químicos del agua residual (Guerrero, Vázquez, & Rodríguez).

En Ecuador las investigaciones de la zeolita se vienen desarrollando desde los años 90 y desde el 2000, los investigadores de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) han realizado estudios tanto en el campus politécnico, como a lo largo de la cordillera Chongón Colonche, en cooperación con la Universidad de Lovaina en Bélgica y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) (Morantes & Graces, 2013).

Las zeolitas son minerales de aluminosilicatos hidratados con una estructura tipo jaula que, alberga grandes áreas tanto externa como internamente. Poseen una estructura de carga negativa debido a la sustitución isomórfica de cationes en el mineral. Por lo tanto, tienen una afinidad fuerte hacia cationes y solo una pequeña afinidad hacia aniones o moléculas orgánicas. La Clinoptilolita es la zeolita natural más abundante y, por lo tanto, es un material muy económico, además es muy eficiente para la remoción de nitrógeno amoniacal presente en aguas residuales (Amaya & Morales, 2021).

Las zeolitas están compuestas por aluminio, silicio, sodio, hidrógeno, y oxígeno. La estructura cristalina está basada en las tres direcciones de la red con TO4 en forma tetraédrica, con sus cuatro oxígenos compartidos con los tetraedros adyacentes. Las propiedades físicas proveen aspectos únicos para una variedad amplia de aplicaciones prácticas (Flores, Galvis, Hernández, González, & Payán, 2007).

Se ha comprobado que, adicionando adecuadamente zeolitas naturales en sus diversas modificaciones catiónicas en los sistemas de filtración, se pueden alcanzar niveles de purificación de aguas bastante notables y lograr no sólo la remoción de fosfatos, sulfatos, y cloruros; sino también, la eliminación de metales pesados como plomo, arsénico, níquel, cobre, y otros contaminantes (Carbonel, 2018).

Dentro de sus propiedades se puede señalar la hidratación y deshidratación, que es un fenómeno físico que varía en función de la presión y temperatura, así como de su armazón estructural, siendo el efecto directo endotérmico y la rehidratación exotérmico. La importancia de esta propiedad radica en el hecho de ocurrir sin que se produzcan alteraciones en el armazón estructural del mineral. Otra de las propiedades más importantes de las zeolitas, que las hace de uso obligado en muchos procesos de deshidratación, es su gran estabilidad térmica y el aumento de su capacidad de adsorción con la temperatura (Mejias, 2016).

En condiciones ambientales la cavidad central, así como sus canales se hallan repletos por moléculas de agua en forma de esferas que rodean a los cationes intercambiables. Si el agua es desplazada a temperatura adecuada (según el tipo de zeolita), estos serán capaces de adsorber moléculas cuyo diámetro sea inferior al de los canales y cavidad central, reteniéndolas dentro de las mismas. Ejemplo de esto es su selectividad por gases como el CO_2, NH_3, entre otros (Sánchez L. Y., 2018).

Las zeolitas pueden ser catalizadores selectivos en cuanto a la forma, tanto por la selectividad del estado de transición o por exclusión de reactivos competidores en base al diámetro de la molécula. También se han utilizado como catalizadores de oxidación. Las reacciones tienen lugar dentro de los poros de la zeolita, que permite un mayor grado de control del producto. Las principales aplicaciones industriales son: refinamiento del petróleo, producción de fuel e industria petroquímica. Las zeolitas sintéticas son los catalizadores más importantes en las refinerías petroquímicas (Mejías, 2016).

La zeolita ofrece un efecto en el filtrado superior al de la arena o al de los filtros de carbón, resultando en agua más pura con mejor productividad y requiriendo menos mantenimiento. La estructura altamente porosa de las zeolitas puede capturar partículas contaminantes de hasta 4 micras. Las zeolitas están cargadas negativamente de forma natural, por lo que pueden adsorber cationes, como metales pesados y amoníaco (Curi, Granda, Lima, & Sousa, 2006).

Es evidente que se está produciendo una contaminación descontrolada en ríos, cañadas y esteros por efluentes urbanos, industriales y mineros, siendo las zeolitas naturales una alternativa efectiva y barata para la descontaminación de estos efluentes al adsorber en su estructura los elementos más comunes de las aguas residuales como son: amoniaco, ácido sulfhídrico, metales pesados, entre otros; además de la retención de ciertas colonias de microorganismos, nocivos para la salud (Lombana, 2023).

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Análisis del agua residual antes de aplicar el filtrado con zeolita

Considerando lo planteado anteriormente se ha considerado realizar una evaluación experimental sobre el uso de la zeolita como depurador de aguas residuales, en función de reducir su contaminación. La muestra está constituida por cinco efluentes de aguas residuales que vierten al río Portoviejo de la ciudad capital provincia de Manabí, según se muestran en el mapa de la figura 2.

Figura 2. Mapa con la localización de los cinco efluentes de aguas residuales estudiados

Para el filtrado se construyó un sistema tubular y en su interior se acondicionaron cuatro capas de zeolita con granulometría diferenciada, es decir cuatro tamaños diferentes de los granos, con el objetivo de propiciar un adecuado nivel de filtrado y un tiempo de retención breve en el sistema.

La zeolita del tipo clinoptilolita fue adquirida comercialmente en la empresa Zeonatec, ubicada en el cantón Isidro Ayora de la vecina provincia de Guayas y se adquirieron granos con la siguiente gravimetría: 1.70mm; 2mm; 2.63mm y; 4.75mm. Para el dispositivo de filtrado se utilizó un tubo de 6” (pulgadas). En la figura 3 se muestra un esquema técnico del sistema de filtrado donde se especifica la estructura gravimétrica de la zeolita.

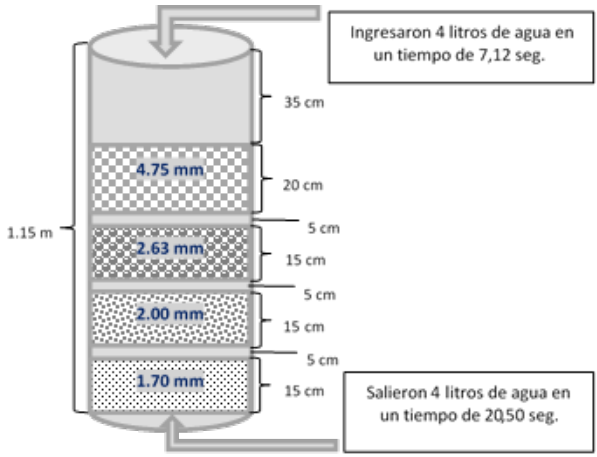


Figura 3. Esquema técnico del sistema de filtrado

Los resultados de los ensayos de laboratorio antes y después de realizar el filtrado con zeolita, permitieron comprobar la efectividad de este mineral para mejorar los parámetros de la calidad de las aguas residuales. Entre los parámetros químicos se encuentran los siguientes:

Se logó remover entre el 50 % y el 75 % del nitrógeno total y especialmente el nitrógeno amoniacal de las muestras tomadas. En la figura 4 se muestra un gráfico comparativo con el comportamiento del parámetro de nitrógeno total antes del filtrado y luego del filtrado.

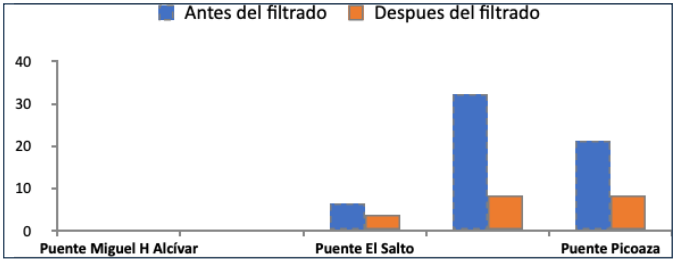


Figura 4. Gráfico comparativo sobre el comportamiento del nitrógeno total antes del filtrado y luego de realizado el mismo.

En la figura 5 se muestra la misma información, pero con relación al nitrógeno amoniacal.

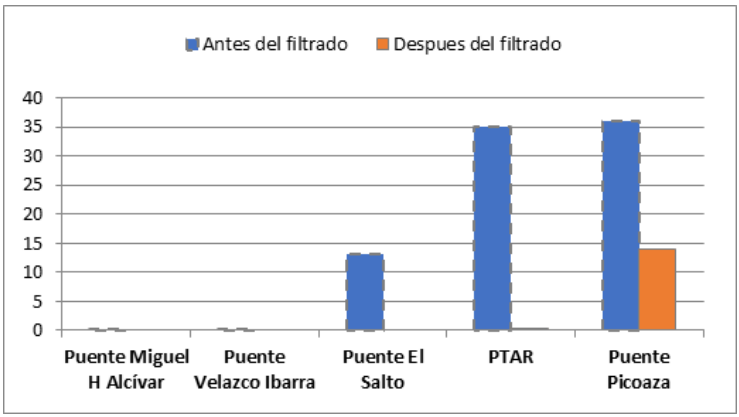


Figura 5. Gráfico comparativo sobre el comportamiento del nitrógeno amoniacal antes del filtrado y luego de realizado el mismo.

Se logró reducir el contenido de fosfato entre un 50% y un 95%, así como la demanda bioquímica de oxígeno, que puede mejorarse hasta en un 45%. En la figura 6 se muestra el Gráfico comparativo sobre el comportamiento del fosfato antes del filtrado y luego de realizado el mismo.

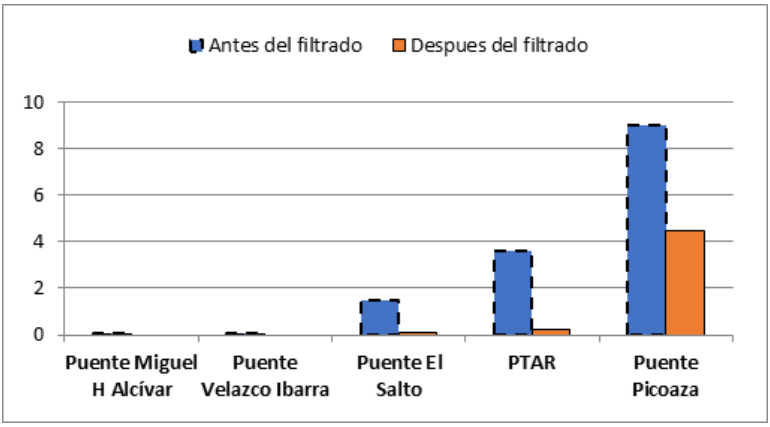


Figura 6. Gráfico comparativo sobre el comportamiento del fosfato, antes del filtrado y luego de realizado el mismo.

En la Figura 7 se muestra la misma información, pero para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

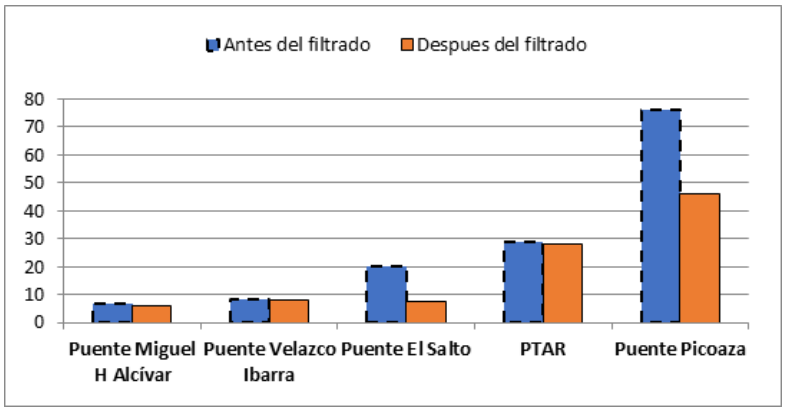


Figura 7. Gráfico comparativo sobre el comportamiento de la DBO, antes del filtrado y luego de realizado el mismo.

Entre los parámetros físicos que pueden ser mejorados mediante el filtrado con zeolita, se encuentran los siguientes:

Se logran reducir los sólidos disueltos entre un 2% y un 8%, así como los sólidos suspendidos que pueden reducirse entre un 35% y un 85%. En la figura 8 se muestra el gráfico comparativo sobre el comportamiento de los sólidos disueltos antes del filtrado y luego de realizado

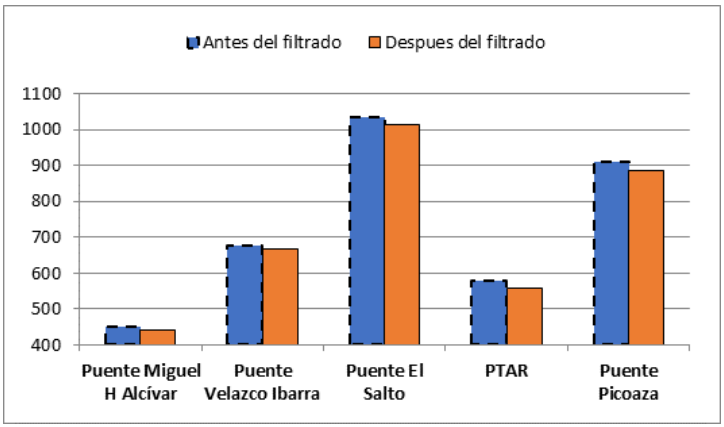


Figura 8. Comportamiento de los sólidos disueltos, antes del filtrado y luego de realizado el mismo.

En la Figura 9 se muestra el gráfico comparativo sobre el comportamiento de los sólidos suspendidos.

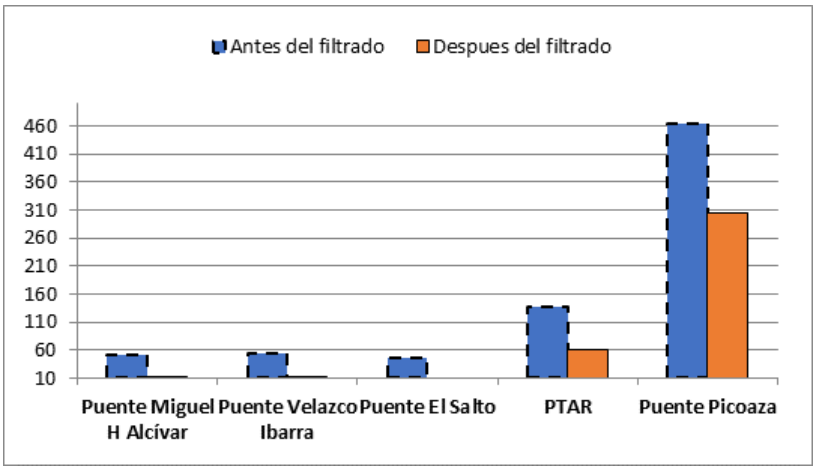


Figura 9. Comportamiento de los sólidos suspendidos.

Se logró mejorar la conductividad eléctrica hasta en un 3% y el oxígeno disuelto se logra mejorar entre un 2% y un 7%.

En la figura 10 se muestra el gráfico comparativo sobre el comportamiento de la conductividad eléctrica relacionada con el oxígeno disuelto después de filtrado el mismo.

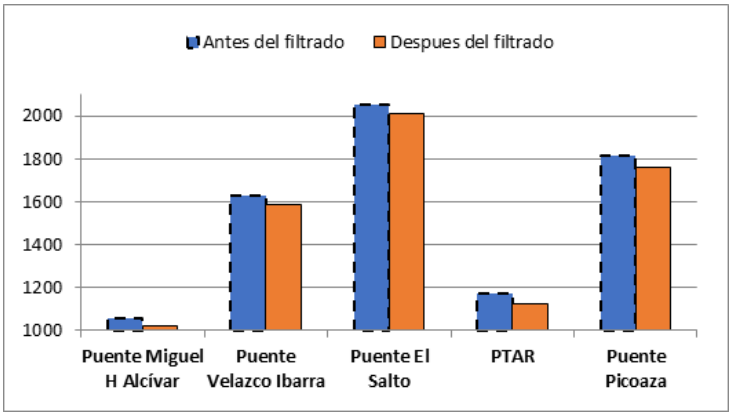


Figura 10. Comportamiento de la conductividad eléctrica, antes del filtrado.

En la Figura 11 muestra el comportamiento de la conductividad eléctrica después del filtrado.

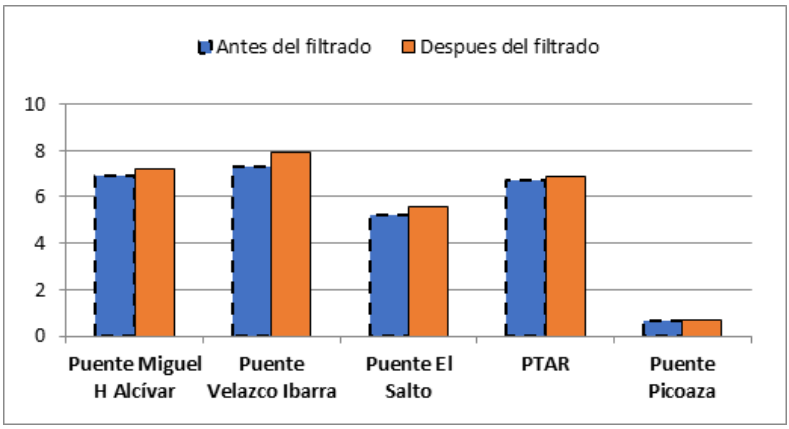


Figura 11. Comportamiento del oxígeno disuelto, después del filtrado.

Como se ha venido describiendo la investigación permitió verificar las propiedades de la zeolita en función de mejorar los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales**.**

Los valores de vacíos de aires que se han logrado obtener para el diseño propuesta con asfalto convencional modificado con polímero, están dentro del rango recomendado por el Manual de Especificaciones del Instituto del Asfalto; es decir, de 3 a 5 % , por lo consiguiente el comportamiento de la mezcla será adecuado.

CONCLUSIONES

Mediante análisis de laboratorio se logró definir la caracterización fisicoquímica del agua residual de cinco efluentes que desembocan en el río Portoviejo, pudiendo identificar los que corresponden a la planta de tratamiento de aguas residuales y del puente de Picoaza, como los más contaminados con amonio.

La posibilidad de poder utilizar la zeolita como material de base para la purificación de las aguas residuales de los efluentes del Río Portoviejo, demuestra la potencialidad de poder aplicar soluciones de tratamiento de aguas residuales en el marco del esquema de desarrollo local, utilizando recursos autóctonos y método técnicos menos costosos y amigables con el ambiente, lo que asegura la sostenibilidad de la propuesta, demostrando que con el empleo de polímeros se tiene un producto de mejores características, la misma que puede ofrecer un mejor comportamiento tanto en resistencia como a las deformaciones (fisuras- ahuellamientos- etc.)

REFERENCIAS

Corradine , J. E., & Espitia , G. A. (2015). Deterioro De Una Base Estabilizada con Asfalto por Factores del Medio Ambiente. *Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas* .

Figueroa Infante, A. S., Reyes Lizcano, F. A., Hernandez Barrera, D., Jimenez, C., & Bohurquez, N. (2007). Analisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfaltica densa en caliente. *Ingenieria e investigación*, 5-15 .

Aamblea Nacinal Legislativa. (2023). *Revision y actuaiación de la norma de calidad ambiental y de descarga de afluentes : Recurso agua.* Presidencia de la República, Norma de calidad y descarga de efluentes: Recurso agua. Obtenido de https://www.cip.org.ec/attachments/article/1579/PROPUESTA%20ANEXO%201.pdf

Alvarez Lugo, A. E., Arámbula Mercado, E., & Spinel, S. C. (2008). Tomografía computarizada con rayos-x y sistema de imágenes de agregados (AIMS) para el estudio de mezclas asfálticas y agregados. *Revista ingenieria e investigación*, 142-151.

Amaya, A. M., & Morales, F. R. (2021). *Determinación de las características físicas desustancias reactivas: Piroclastos volcánicos,Zeolita.* Obtenido de https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/32615/1/Tesis%20I.%20C.%201478%20-%20Amaya%20Diaz%20Ana%20Mar%C3%ADa.pdf

ASTM C127-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org. (s.f.).

ASTM C131 / C131M-14, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, ASTM International, West Conshohocken, PA. (2006).

ASTM D1559-89 Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (Withdrawn 1998). (s.f.).

ASTM D3515-01, Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures (Withdrawn 2009), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001, www.astm.org. (s.f.).

Bofill, S., Clemente, P., Albiñana, N., Maluquer, C., Hundesa., & Girones, R. (2005). Efectos sobre la salud de la contaminación de agua y alimentos por virus emergentes humanos. *Revista Española de Salud Pública, 79*(2), 253-269. Obtenido de https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_isoref&pid=S1135-57272005000200012&lng=es&tlng=es

Campoverde, J., Naula, F., Coronel, K., & Romero, A. (2018). The change of the energy matrix in Ecuador; a perspective of its reality. *Acordes, 8*. Obtenido de https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/acordes/article/view/4349/3220

Carbonel, D. (2018). Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parámetros de Operación, Isotermas y Cinética. *Ingeniería, 23*(3), 252-273. doi:https://doi.org/10.14483/23448393.13418

Cárdenas , J., & Fonseca, E. (2009). Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificadocon polimeros reciclado, estudiada desde la relación viscocidad temperatura. *Revista EIA*, 125-137.

Cárdenas, É. P. (2022). El agua potable en la agenda pública de las instancias metropolitanas en Guadalajara. *Revista Ciudades, Estados y Política, 9*(1), 15-34. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2462-91032022000100015

Castro, O. E., & Moncada Rangel, J. A. (2022). Educación ambiental para el manejo sustentale del agua en la comunidad Toro Muerto, Río Caronil. *Revista Digital del Doctorado en Educación, 8*(15), 61-84. doi:https://doi.org/10.55560/arete.2022.15.8.3

Castro, O., & Moncada, J. A. (2022). Educación ambiental para el manejo sustentable del agua en la comunidad Toro Muerto río Carní. *Castro, Omar Enrique, & Moncada Rangel, José Alí, 8*(15), 61-84. doi:https://doi.org/10.55560/arete.2022.15.8.3

CEPAL. (2019). *Recursos naturales,medio ambientey sostenibilidad. 70 años de pensamiento de la CEPAL.* Copyright © Naciones Unidas. Obtenido de https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/e43ad745-6b7d-48e4-a016-b753fdd3b659/content

Curi, A., Granda, W., Lima, H., & Sousa, W. T. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. *Información tecnológica, 17*(6), 11-118. doi:http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642006000600017

Espigares, M., & Pérez, J. A. (2015). *Aguas residuales. Composición.* Obtenido de https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf

Flores, A., Galvis, A., Hernández, T. M., González, F., & Payán, F. (2007). Efecto de la adición de zeolita (clinoptilolita y mordenita) en un andosol sobre el ambiente químico edáfico y el crecimiento de avena. *Interciencia, 32*(10), 692-696. Obtenido de https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442007001000010#:~:text=Las%20zeolitas%20son%20aluminosilicatos%20con,i%C3%B3nico%20con%20el%20medio%20circundante.

Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., Gómez López, J. A., Romero, S. A., & Alarcón Orta, H. A. (2004). Aspectos del diseño volumetrico de mezclas asfalticas. *Intituto Mexicano del Transporte* .

Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., Gomez Lopez, J. A., & Alvarado Gonzalez, M. (2004). Comportamiento de mezclas asfalticas modificadas con SBR. *Secretaria de comunicaciones y transporte*.

Gómez, H. R. (2015). *Fiscalización ambiental en aguas residuales. Organusmo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA).* Ministerio del Ambiente de Perú,. Obtenido de https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827

Guerrero, M. S., Vázquez, A., & Rodríguez, M. (s.f.). La zeolita en la descontaminación de aguas residuales. *UNIVERSIDAD, CIENCIA y TECNOLOGÍA, Especial*(2), 109-117. Obtenido de https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/download/73/74/

IDRICA. (2022). *Las 4 etapas de las plantas de tratamiento de aguas residuales*. Obtenido de https://www.idrica.com/es/blog/plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-etapas/#:~:text=Normalmente%20se%20distribuyen%20en%204,obtenidos%20en%20los%20diferentes%20tratamientos.

Jacobo, F. d. (2018). Aguas residuales urbanas y sus efectos en la comunidad de Paso Blanco, municipio de Jesús María, Aguascalientes. *Revista de El Colegio de San Luis, 8*(6), 267-293. doi:https://doi.org/10.21696/rcsl9162018760

Jimenez, G., & Torres, M. E. (2013). Superficie de rodadura. En *Norma Ecuatoriana vial NEVI-12 - MTOP.* Quito.

Lombana, O. (2023). *Revisión del estado de avance de las aplicaciones de la nanotecnología para la reucción de contaminantes presentes en los vertimientos de la industria textil.* Repositoro Unversidad de Las Américas. Obtenido de https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/9124/1/5656272-2022-II.GA.pdf

Macias Sanchez , L. K., Ortiz Hernández, E. H., Quiroz Fernandez, L. S., & Ruiz Parraga, W. E. (2018). Determination of Physical and Mechanical Properties of Quarries Dos Bocas Mouths and Mine Copeto for High Resistance Concretes. *InternationalResearch Journal of Engineering, IT & Scientific Research*, 33-40.

Mejias, F. S. (2016). *Zeolitas: generalidades, potenciales y sus aplicaciones en energía.* Repositorio. Obtenido de https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/197/MejiaRodriguezFerneySantiago2016.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Morantes, F., & Graces, D. (2013). *Caracterización Mineralógica Del Depósito De Zeolitas Naturales En El Río Guaraguau (Isidro Ayora, Provincia Del Guayas) Y Su Aplicación En La Remoción De Amonio En Aguas Residuales.* Repositorio ESPOL. Obtenido de https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/24645

OMS. (2013). *Guías de OMS, uso seguro de aguas residuales y excretas.* Obtenido de https://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/378/mod_page/content/148/Session3a_Medlicott_WHO_En.pdf

OMS. (2013). *OMS, Safe Use of Wastewater, Greywater and excreta. Guías de OMS Uso seguro de aguas residuales y excretas, 2013. Consultado el 2 de noviembre de 2017. Disponible el: http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/378/mod_page/content/148/Session3a_Me*. Obtenido de http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/378/mod_page/content/148/Session3a_Me

ONU. (2023). Acerca de nuestro trabajo para los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Ecuador. Obtenido de https://ecuador.un.org/es/sdgs

ONU. (2023). *https://www.un.org/es/global-issues/water*. Obtenido de https://www.un.org/es/global-issues/water

Ortiz Hernández, E. H., Ortiz Moncayo, E. H., Macias Sanchez, L. K., & Pachana de Cardero, R. (2017). Behavior of Clayey Soil Existing in the Portoviejo Canton and Its Neutralization Characteristics. *International Research Journal of Engineering, IT & Scientific Research (IRJEIS)*, 1-10.

Reyes Ortiz, O. J., Camacho Tauta, J. F., & Londoño León, A. (2013). Caracterización mecánica de mezclas asfálticas en función del origen y gradación del agregado pétreo. *Revista científica General José María Córdova*, 215-232.

Rodríguez, M. V. (2017). La ordenación territorial y las fuentes renovables de energía. *ConFigSIG.* Obtenido de https://filosofia.uazuay.edu.ec/memorias/article/download/74/68

Rodríguez, M., Vázquez, A., & Millet, Z. (2017). Fuentes de energía renovables y desarrollo local. *Revista Internacional de Ciencias Sociales y Humanidades (IJSSH), 1*(2), 10-19. doi:https://doi.org/10.29332/ijssh.v1n2.31

Sacyr. (2023). *Análisis geográfico enfocado a potenciar las energías renovables*. Obtenido de https://www.sacyr.com/-/analisis-geografico-enfocado-a-potenciar-las-energias-renovables

Sánchez, L. Y. (2018). *Empleo de Zeolitas en procesos de adsorción y separación de hidrocarburos de cadena corta.* Universidad de Valencia. Obtenido de https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/107362/S%C3%81NCHEZ%20-%20Empleo%20de%20zeolitas%20en%20procesos%20de%20adsorci%C3%B3n%20y%20separaci%C3%B3n%20de%20hidrocarburos%20de%20cadena%20corta.pdf?sequence=5&isAllowed=y

Sánchez, S. A., & Guangasig, V. H. (s.f.). Calidad Microbiológica del Agua de Consumo Humano: La realidad en el Ecuador. *LATAM, IV*(2), 2023. doi:https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.690

UNESCO. (2023). *https://www.unesco.org/es/articles/riesgo-inminente-de-una-crisis-mundial-del-agua-unesco/onu-agua*. Obtenido de https://www.unesco.org/es/articles/riesgo-inminente-de-una-crisis-mundial-del-agua-unesco/onu-agua

Vargas Nordebeck, A. (2013). *Evaluacion del desempeño de mezclas asfaltica en caliente con y sin adcion de polimeros modificantes para mezclas tipicas en Costa Rica.* San Jose, Costa Rica.

Vázquez, A. (2022). *El manejo de fuentes renovables de energía para el desarrollo local endógeno y sostenible en la provincia de Manabí*. alicante: Universidad de Alicante. Obtenido de https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/129052

Velázquez, L. d. (2023). Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas, 25*. doi:https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.482

CAPÍTULO 13

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ELÉTRICO E MECÂNICO DA LIGA EUTÉTICA DE AL-1,5%NI TRATADA TERMICAMENTE

Data de submissão: 22/02/2024 *Data de aceite: 01/04/2024*

Luane Luiza Pereira Marques
Universidade Federal do Pará. Belém - PA
http://lattes.cnpq.br/9438927804105514

Deibson Silva da Costa
Universidade Federal do Pará
Ananindeua - PA
http://lattes.cnpq.br/1521124351431087

Wellington Bruno Silva de Jesus
Instituto Militar de Engenharia
Rio de Janeiro - RJ
http://lattes.cnpq.br/7737719249484101

Héricles Ruiliman Oliveira de Souza
Universidade Federal do Pará. Belém - PA
http://lattes.cnpq.br/6917023290436260

Emerson Rodrigues Prazeres
Universidade Federal do Pará. Belém - PA
http://lattes.cnpq.br/8918189837419936

Otávio Fernandes Lima da Rocha
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará. Belém - PA
http://lattes.cnpq.br/0702326922309672

Maria Adrina Paixão de Souza da Silva
Universidade Federal do Pará. Belém - PA
http://lattes.cnpq.br/6642036918358829

RESUMO: Com o avanço da globalização, aumentou-se a procura por novas tecnologias e materiais que possuam substituir os já existentes, isso impulsiona o meio científico, principalmente dentro do setor energético. Desta forma a produção de ligas de alumínio está ganhando bastante espaço nesse setor, pois suas propriedades são atraentes ao setor de energia. O objetivo deste trabalho foi produzir uma liga de Al-1,5%Ni, tratá-las termicamente, em seguida avaliar suas propriedades elétricas e de resistência a tração. A liga foi fundida pelo método de fundição convencional, em seguida usinada, solubilizada e envelhecida artificialmente a 350ºC, laminada para produção dos fios com diâmetro de 3 mm, posteriormente, submetidos aos ensaios de condutividade elétrica e resistência mecânica. A análise dos dados obtidos mostrou que o tratamento térmico proporcionou um crescimento de apenas 1,07% em sua condutividade, diferentemente do LRT obtido no qual a liga teve um decréscimo de 28,94%, verificando que após o tratamento térmico o material possivelmente apresentará maior fragilidade.
PALAVRAS-CHAVE: Ligas de alumínio. Tratamento térmico. Condutividade elétrica. Resistência à tração.

ANALYSIS OF THE ELECTRICAL AND MECHANICAL BEHAVIOR OF THE EUTECTIC ALLOY AL-1.5%NI THERMALLY TREATED

ABSTRACT: With the advancement of globalization, there has been an increased demand for new technologies and materials that can replace existing ones, driving scientific advancements, particularly within the energy sector. In this context, the production of aluminum alloys is gaining significant traction in the energy sector due to their appealing properties. The objective of this study was to produce an Al-1.5%Ni alloy, subject it to heat treatment, and subsequently evaluate its electrical and tensile strength properties. The alloy was melted using the conventional casting method, then machined, solutionized, and artificially aged at 350 °C. It was further rolled to produce wires with a diameter of 3 mm, which were then subjected to tests for electrical conductivity and mechanical strength. The analysis of the obtained data revealed that the heat treatment resulted in a mere 1.07% increase in conductivity, contrasting with the Longitudinal Residual Tensile (LRT) obtained, where the alloy experienced a 28.94% decrease. This suggests that after heat treatment, the material may exhibit increased fragility.
KEYWORDS: Aluminum alloys. Heat treatment. Electrical conductivity. Tensile strength.

INTRODUÇÃO

O grande avanço global impulsionou o procura por novas tecnologias, que sejam mais viáveis e menos onerosas ao setor industrial, ou seja, materiais capazes de substituir os já existentes, tendo menores custos produtivos e impactos ambientais. De acordo com a InterAcademy Council (2007), é necessário o desenvolvimento de tecnologias, que melhorem a transmissão desta energia para suprir tal demanda. Em função desta problemática os estudos das ligas de alumínio para fins de transmissão de energia elétrica, vem avançando exponencialmente, pois este metal possui propriedades bastantes satisfatórias a essa utilização.

As ligas metálicas são materiais que possuem propriedades metálicas, composto pela união de dois ou mais componentes, no qual o componente principal é um metal (SANTOS, 2006) podendo conter metais ou ametais como elementos de liga, essa solução sólida busca melhorar as propriedades do metal base da liga quando solicitado eletricamente.

O níquel é o elemento mais comumente utilizado em conjunto com o cobre para realçar as propriedades do material à altas temperaturas. Também é responsável pela redução do coeficiente de expansão térmica da liga (KAUFMAN e ROOY, 2004). O tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades (PRAZERES, 2014).

O objetivo deste trabalho foi analisar as propriedades elétricas e o limite de resistência a tração (LRT) da liga de Al-1,5%Ni, após o tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial a 350 °C por 4 horas.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O alumínio é um metal leve com densidade de 2,7 g/cm^3 de 3 ºC a 20 ºC. Seu ponto de fusão corresponde a 660 ºC. Sua ductilidade é elevada: alongamento de 60 % a 70 %; e a sua resistência a corrosão é boa, devido à formação de oxido superficial Al_2O_3, que é muito estável (CHIAVERINI, 2003). Vale ressaltar que o alumínio (Al), tem a segunda maior condutividade elétrica dos metais não preciosos, perdendo apenas para o cobre que, entretanto, apresenta vários obstáculos para o seu uso em função do alto custo (MARQUES, 2008). Com isso pode-se afirmar também que o alumínio possui uma alta capacidade de ser submetido a deformações sem sofrer fissuras, além de endurecer gradativamente (FREITAS, 2010).

Assim, de acordo com Dantas (2014), o níquel é um dos poucos metais solúveis em alumínio, capaz de formar intermetálicos como Al_3Ni, Al_3Ni_2, AlNi, Al_3Ni_5 e $AlNi_3$, que produzem efeitos pronunciados nas propriedades mecânicas, mesmo presente em pequenas quantidades. A adição de Ni, na presença de tratamento térmico de envelhecimento, faz com que com que a liga de alumínio tenha boa resistência mecânica sem uma perda considerável de suas propriedades elétricas, o que sugere que este material pode ter potencial uso na indústria (PRAZERES, 2016).

Então, o processo de fabricação por fundição é aquele em que se obtêm peças pela aplicação de temperaturas acima do ponto de fusão do metal ou da liga desejada, com subsequente solidificação e resfriamento em um molde (PARIS, 2008). O molde é comumente chamado de coquilha e é largamente utilizado na fabricação de peças como alumínio e suas ligas, pois é quase sempre fabricado em aço que tem ponto de fusão muito superior ao do alumínio (MASSARO, 2017). A solidificação de ligas é caracterizada por uma transformação de fase com mudança de estado, em que a fase líquida se transforma em uma fase sólida, através da nucleação e do crescimento de partículas da fase sólida no interior da fase líquida (SANTOS, 2006).

O alumínio e suas ligas podem ser tratados de modo a obter a combinação de propriedades mecânicas e físicas desejadas. Os tratamentos térmicos baseiam-se na variação das solubilidades dos elementos microestruturais (OLIVEIRA, 2012). O recozimento é um processo térmico aplicado a materiais para alterar suas propriedades físicas e mecânicas. Esse processo envolve o aquecimento do material a uma temperatura elevada e, em seguida, o resfriamento controlado (DE MORI e CESCONETI, 2018).

METODOLOGIA

As ligas foram vazadas em cadinhos de SiC, Figura 1(a), que primeiramente foi aquecido no forno de marca GREFORTEC Figura 1(b), até 400 °C para eliminação da umidade que pode ter sido absorvida da atmosfera, em seguida retirado e pintado com caulim que é um material formado por silicatos hidratados de alumínio, sua utilização se dá devido a sua propriedade de cobertura quando utilizado como pigmento diluído em H2O, possuindo baixa condutividade térmica que o faz um excelente material para revestimento interno no cadinho.

De acordo com Prazeres (2014) após o pré-aquecimento, o cadinho foi aquecido no forno até a 900 °C, permanecendo por 30 minutos para formação dos vidrados que auxiliam na resistência e durabilidade do recipiente.

(a) **(b)**

Figura 1 - Cadinho pintado com caulim; (b) Forno utilizado para produção das ligas.

O alumínio e níquel foram colocados dentro do cadinho retornando ao forno por mais uma hora e trinta minutos, após a constatação da fundição total dos elementos o cadinho e retirado do forno para a realização da homogeneização do material utilizando uma espátula de aço que anteriormente foi aquecida em uma estufa e pintada com caulim evitando a aderência do material durante a agitação vigorosa.

Posteriormente, foi injetado o argônio na vazão de 0,2L/s através de um tubo de aço inoxidável ligado a um cilindro de 10 mm^3 durante 1minuto, para a remoção de gases e impurezas com baixa densidade, foi formado na superfície do banho uma camada de escória que o protege contra a reincidência de gases nocivos ao banho metálico, o gás e injetado duas ou mais vezes para garantia da remoção de boa parte das impurezas na solução.

Após, foi realizado o vazamento do banho metálico no molde em formato de U conforme mostra Figura 2, que foi anteriormente lixado, aquecido e pintado com solução de caulim juntamente com a espátula de aço. O vazamento foi realizado de maneira continua sendo feito o desmolde da peça após 24 horas tempo hábil para total solidificação. Em seguida foram feitos cortes para a retirada de uma seção para a metalografia e outra para usinagem.

Figura 2 – Molde utilizado no vazamento.

Os corpos de prova foram usinados no torno mecânico para diminuição do diâmetro de 22,5 mm (molde) para 18,5 mm, com intuito de facilitar o processo de laminação a frio realizado em uma laminadora semi-industrial, para produção dos fios com diâmetro de 3 mm. Desta maneira os fios obtidos foram cortados em tamanhos de 45 cm e 20 cm dentro dos parâmetros para os seguintes ensaios.

Após o processo de usinagem o tarugo da liga foi solubilizado, aquecido em estufa até a de 350 °C durante 4 horas, em seguida os corpos de prova foram resfriados, rapidamente em água, para eliminação de partículas de segunda fase devido a presença do Ni. Posteriormente, envelhecidos artificialmente a temperaturas 175 °C durante uma hora, em seguida foram resfriados lentamente dentro da estufa, retirados após 24 horas.

O ensaio foi realizado com o auxílio do Microhmímetro MEGABRÁS (ponte de kelvin), modelo MPK-2000, as resistências elétricas dos fios foram medidas a uma temperatura superior a 10 ºC e inferior a 30 ºC e corrigida para a temperatura de 20 ºC como a norma NBR 5118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), para o diâmetro estudado também foi utilizada a norma NBR 6814 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010). Os resultados sendo transformados em condutividade elétrica (IACS) "*International Annealed Cooper Standard*", padrão internacional de condutividade correspondente à apresentada por um fio de cobre com 1 m de comprimento, 1 mm^2 de seção transversal a 20 ºC.

A caracterização mecânica foi realizada em uma máquina de ensaio de tração KRATOS, acoplada a um microcomputador para o armazenamento de dados, os corpos de prova foram adaptados para esse ensaio de acordo com a norma NBR 6810 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010) e NBR ISO 6892 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), respeitando as distâncias entre garras, nesse ensaio foram usados dois corpos de prova com diâmetro de 3 mm e 20 cm de comprimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3, apresenta os resultados do ensaio de condutividade elétrica para as liga Al-1,5%Ni, sem tratamento térmico e tratada termicamente por envelhecimento artificial a 350 °C durante 4 horas para o diâmetro de 3 mm. Este ensaio foi realizado em três pontos ao longo do fio.

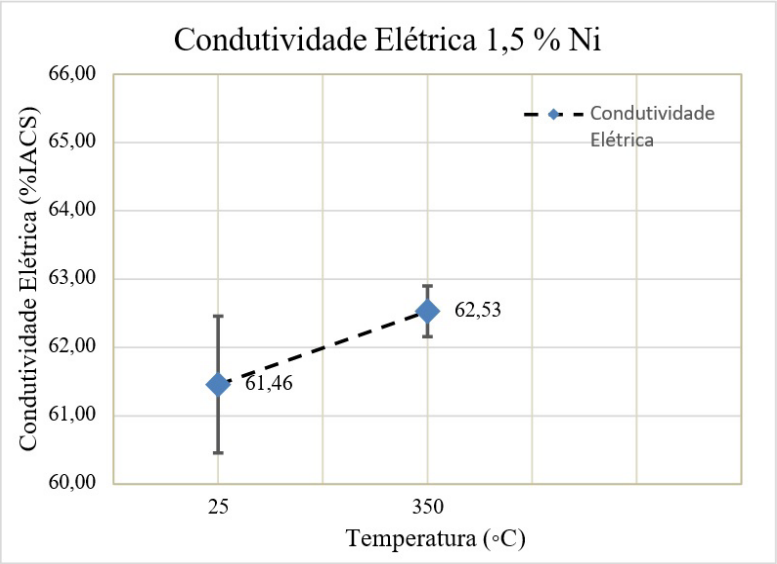


Figura 3 - Condutividade elétrica em função da temperatura da liga Al-1,5%pNi sem e com tratamento térmico

Os dados da Figura 3 mostra que a liga Al-1,5%Ni teve um aumento de 1,07% passando de 61,46% para 62,53% após ser tratada termicamente, ao ser comparada com os padrões estabelecidos pela Associação Brasileira do Alumínio (2014) que evidência que a condutividade do alumínio puro é 62%, observa-se que os resultados obtidos estão dentro do critério estabelecido, não havendo perdas em sua condutividade quando comparado com o material puro.

Este fenômeno pode estar relacionado a maior concentração de soluto que aumentou o número de discordâncias no material, funcionando como barreiras e dificultando a propagação de corrente elétrica. O mecanismo de segregação que compreende a diferença de concentração da liga produzida foi influenciado na distribuição dos elementos na mesma, impactando diretamente nas propriedades físicas e químicas do produto, onde pode ocorrer heterogeneidades tanto de forma macroscópica como microscópica e pontual. Neste caso, nota-se diferenças em suas características elétricas (FERREIRA, 2004; GOMES, 2012).

A Figura 4 apresenta os resultados do ensaio de tração que foi realizado nos fios das ligas Al-1,5%Ni sem e com tratamento térmico na temperatura 350ºC, com o objetivo de analisar o LRT (Limite de Resistência a Tração) dos fios, realizando a comparação dos resultados.

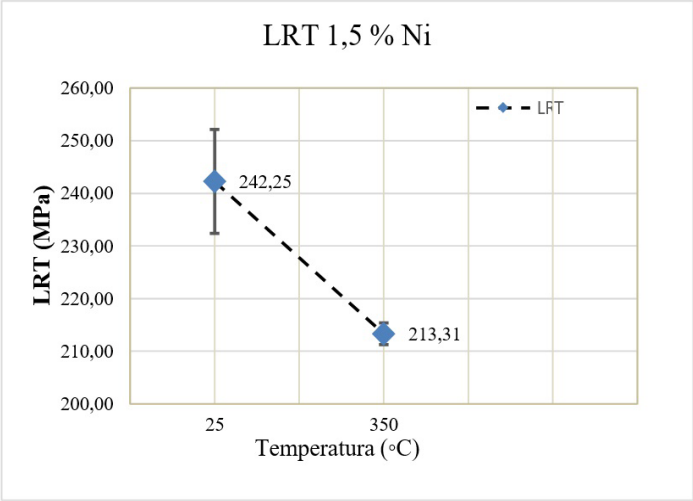


Figura 4 - LRT em função da temperatura da liga Al-1,5%Ni sem e com tratamento térmico

A análise gráfica demonstra que diferentemente da condutividade houve uma diminuição no LRT da liga Al-1,5%pNi após o tratamento térmico de 242,25(MPa) para 213,31(Mpa) respectivamente, com uma diminuição de 28,94%. Segundo Santos (2006), a densidade das discordâncias, concentradas nos contornos dos grãos deformados influência diretamente na resistência mecânica e na dureza, ao contrário dos defeitos pontuais.

De acordo com Prazeres (2014), a melhora de uma ou mais propriedades, mediante um determinado tratamento térmico, é conseguida com prejuízo de outras. Por exemplo, o aumento da ductilidade provoca simultaneamente queda nos valores de dureza e resistência à tração. Pois após ser tratada termicamente e notável a diminuição no seu LRT e na ductilidade do material, tornando possivelmente mais frágil.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados obtidos no ensaio de condutividade indicam que o tratamento térmico foi eficaz em realçar as propriedades elétricas do material, pois foi observado um pequeno ganho em suas características, melhorando assim sua capacidade de condução de corrente elétrica. Diferentemente, dos resultados obtidos no ensaio de tração, o limite de resistência à tração foi inferior após o tratamento térmico, apresentando uma drástica diminuição, o que sugere um aumento na fragilidade do material.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao Laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA (LABEM-UFPA), assim como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5118: **Fios De Alumínio 1350 Nus, De Seção Circular, Para Fins Elétricos**, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6810: **Fios E Cabos Elétricos – Tração À Ruptura Em Componentes Metálicos**, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6814: **Fios e cabos elétricos – Ensaio de resistência elétrica,** 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6892-1: **Materiais metálicos - Ensaio de Tração Parte 1: Métodos de ensaio à temperatura ambiente,** 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia Técnico do Alumínio: Extrusão.** Ed. Cinco, n. 1, São Paulo, 2014.

CHIAVERINI, Vincente. **Tratamento Térmicos das Ligas Metálicas**. São Paulo: ABM, 2003, p. 243.

COUNCIL, InterAcademy. **Um futuro com energia sustentável:** iluminando o caminho. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, p. 301, São Paulo, 2007.

DANTAS, P. P. **Caracterização de ligas hipereutéticas da Al-Ni solidificadas unidirecionalmente.** 2014. 103 f. Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia), Universidade de Brasília, Brasília- DF, 2014.

DE MORI, G. N.; CESCONETI, Lorena Bertranda. Análise das propriedades metalográficas do aço SAE 1045 nos processos térmicos de normalização, revenimento e têmpera. **Revista Esfera Acadêmica Tecnologia**, v. 3, n. 1, p. 29-38, 2018.

FERREIRA, Ivaldo Leão. **Análises numérica, analítica e experimental da macrossegregação inversa na solidificação.** 2004. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2004.

FREITAS, E. S. **Correlação entre as propriedades mecânicas e elétricas de fios para Tx e Dx de energia elétrica do Al-EC modificado com teores de silício e zircônio**. 2010. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

GOMES, Laercio Gouvea. **Microestrutura dendrítica, macrossegregação e microporosidade na solidificação de ligas ternárias Al-Si-Cu.** 2012. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2012.

KAUFMAN, J. Gilbert; ROOY, Elwin L. The Influence and Control of Porosity and Inclusions in Aluminum Castings. **Aluminum alloy castings:** properties, processes and applications. Materials Park. ASM International, p. 47-54, 2004.

MARQUES. P. R. **Caracterização térmica, mecânica e elétrica da liga al-0,6%mg-0,8%si refinada e modificada com diferentes teores de cobre.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

MASSARO. A. G. **Comparação das características de desempenho de um rotor fechado de fluxo radial, aplicado em bomba centrífuga, produzido via fundição convencional e fundição de precisão (investment casting).** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

OLIVEIRA, Guilherme Ruivo Gordalina de. **Tratamento térmico de uma liga Al-Si-Mg-Mn**. 2012. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2012.

PARIS, Aleir Antonio Fontana. **Tecnologia da Fundição**. Santa Maria - RS: Independente, 2008. 185 f.

PRAZERES, Emerson Rodrigues. **Avaliação da modificação da liga base Al Cu Fe Mg por teores de Ni e Ti quanto a caracterização estrutural, elétrica e mecânica, a partir de ligas solidificadas em molde "U".** 2016. Dissertação de Mestrado PPGEM/UFPA. Belém. 2016.

PRAZERES, Emerson Rodrigues. **Estudo do tratamento térmico e da modificação da liga al0,05%pcu-[0,24- 0,28]%pfe-0,6%pmg com a adição de 0,03%**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2014.

SANTOS, Rezende Gomes. **Transformação de fases em materiais metálicos**. Campinas: Editora da Unicamp, p. 399-408, 2006.

CAPÍTULO 14

ANÁLISE DO RISCO BIOMECÂNICO COM FERRAMENTAS ERGONÔMICAS EM POSTO DE INJEÇÃO PLÁSTICA NO DISTRITO INDUSTRIAL DE MANAUS

Data de aceite: 01/04/2024

Kyssia Roberta Sena Batista de Souza
Instituto de Ensino Superior (FUCAPI)
Manaus – AM – Brasil

Neila Newdirley Câmara Pinto
Instituto de Ensino Superior (FUCAPI)
Manaus – AM – Brasil

RESUMO: O presente artigo tem como objetivo uma comparação no uso de ferramentas utilizadas em uma Análise Ergonômica do Trabalho (AET), para identificação de fatores de riscos no posto de Operação de Injetora Plástica. Para as identificações dos riscos biomecânicos e soluções das situações encontradas deste estudo de caso, foram utilizadas fotografias do posto em que o operador executa suas atividades, além da entrevista sobre a percepção dos problemas, e aplicação das ferramentas ergonômicas REBA, KIM, NIOSH que serviram de base para as sugestões de melhorias propostas na ergonomia do posto de trabalho. Visto que na ferramenta REBA que avalia rapidamente o copo inteiro o resultado foi de risco moderado, na KIM o transporte manual de carga o resultado foi risco moderado e na ferramenta NIOSH levantamento de peso apresentou risco moderado.

ANALYSIS OF BIOMECHANICAL RISK WITH ERGONOMIC TOOLS AT A PLASTIC INJECTION STATION IN THE INDUSTRIAL DISTRICT OF MANAUS

ABSTRACT: This article aims to compare the use of tools used in an Ergonomic Work Analysis (AET), to identify risk factors at the Plastic Injection Operator Station. For the identification of biomechanical risks and solutions of the situations found in this case study, photographs were used of the post where the operator performs his activities, as well as the interview about the perception of the problems, and application of the ergonomic tools REBA, KIM, NIOSH that served basis for suggestions for improvements in workplace ergonomics. Since in the REBA tool that quickly evaluates the whole glass the result was of moderate risk, in KIM the manual load transport the result was moderate risk and in the NIOSH weight lifting tool presented moderate risk.

INTRODUÇÃO

A ergonomia é fundamental para a adequação de um ambiente laboral, pois por meio desta podem ser aplicadas teorias, princípios e métodos para projetar um espaço de trabalho adequado, proporcionando melhor desempenho para o bem estar humano e produtividade do colaborador.

Nesse sentido, as ferramentas ergonômicas auxiliam dentre outros aspectos, na identificação de cargas de trabalho que podem levar o colaborador a sofrer lesões musculoesqueléticas. Essas lesões podem ser causadas por fatores de risco em que incidem movimentos repetitivos, intensificação do trabalho, posturas inadequadas, adotadas de forma consciente ou circunstancial, por colaboradores que ao realizarem suas atividades, não encontram acessibilidade adequada entre máquinas, lidar com movimentação e deambulações constantes ou de grandes distâncias e transporte de cargas excessivas, entre outros. Tais fatores podem influenciar no afastamento do colaborador de suas atividades laborativas, incorrendo ainda em acidentes de trabalho, doenças ocupacionais de gravidades diversas, temporárias ou permanentes, como fadiga ou estresse.

Este trabalho objetiva contribuir com uma comparação no uso de ferramentas ergonômicas utilizadas em uma Análise Ergonômica do Trabalho (AET), para identificação de problemas ergonômicos e fatores de risco no posto de trabalho de Operação de Injetora Plástica, que ocasiona as lesões decorrentes de condições de trabalho inadequadas, avaliando a criticidade do posto em relação a atividade física desenvolvida, em determinado membro exposto do corpo.

Existem várias ferramentas que são utilizadas para a facilitação de análises ergonômicas e que podem ser úteis para avaliar situações de trabalho com problemas ergonômicos. Nesta pesquisa, para compor a AET foram aplicadas as seguintes ferramentas avaliativas: a ferramenta de avaliação rápida do corpo inteiro (REBA), a ferramenta KIM, avalia o modo de levantar/baixar, segurar e transportar; NIOSH avalia o levantamento de cargas. Para melhor apreciação da AET foram utilizadas fotografias do posto de trabalho, em que o operador executa suas atividades, além da entrevista com o mesmo acerca de sua percepção sobre os problemas acionais, movimentacionais, físico-ambientais, operacionais, decorrentes da atividade laboral no posto em questão. A síntese ergonômica do trabalho, a partir da descrição da tarefa relacionou o caderno de recomendações e diagnostico do posto de trabalho.

REFERENCIAL TEÓRICO

Ergonomia e Análise Ergonômica do Trabalho

O termo ergonomia significa, etimologicamente, o estudo das leis do trabalho. É conveniente aprofundar esta definição e o objeto que ela designa o trabalho. De acordo com Ilda (2005), a ergonomia é um estudo da adaptação do trabalho ao homem.

A International Ergonomics Association (IEA) define ergonomia (ou fatores humanos) como: uma disciplina científica preocupada com o entendimento das interações entre seres humanos e outros elementos de um sistema, e a profissão que aplica teoria, princípios, dados e métodos ao design, a fim de otimizar o bem-estar humano e o sistema de desempenho. A ergonomia ajuda a harmonizar as coisas que interagem com as pessoas em termos de necessidades, habilidades e limitações das pessoas.

Para Hughes e Nelson (2009) é importante reconhecer que as empresas investem em ergonomia. Várias são as razões, pois além do projeto de retorno sobre o investimento, inclui a obrigação ética de fornecer um ambiente de trabalho seguro, de conformidade regulamentar, mantendo-se competitiva no mercado para os funcionários mais talentosos e de acordo com a negociação coletiva. Neste sentido, Miles e Perrewé (2011) destacam que na busca da competitividade é preciso proteger os ativos organizacionais, e através da ergonomia reduzir custos médicos, baixar o absenteísmo e melhorar a satisfação do colaborador.

Existem diversas definições de ergonomia, porém é a interação do trabalho fazendo com que tenha maneiras confortáveis para o colaborador realizar suas atividades laborais, assim visando colaborar com o conceito de produtividade em conjunto com os conceitos de bem-estar e qualidade, reduzindo a penosidade do ser humano, com isso melhorando e adaptando ao trabalho e reduzindo afastamentos por lesões por esforço repetitivo.

A análise ergonômica se faz necessário em qualquer atividade, e importante uma boa avaliação do posto de trabalho com o uso de métodos e ferramentas adequadas para que consiga atingir os objetivos assim também verificando os fatores que podem afetar este colaborador durante a jornada de trabalho. Nesse sentido, a Análise Ergonômica do Trabalho (AET) é a melhor maneira de se conhecer um ambiente de trabalho, com a finalidade de propor mudanças e alterações que causarão mudanças positivas nas condições de trabalho dos colaboradores (FERREIRA; RIGHI, 2009). De acordo com Menezes e Santos (2014), a AET é responsável pela geração de um diagnóstico claro que ajudara a orientar e conduzir as modificações necessárias à melhoria das condições ergonômicas do trabalho, focadas nos riscos identificados.

Merino (2008) afirma que a análise ergonômica do trabalho compreende três fases: análise da demanda, análise da tarefa e análise ds atividade.

A análise ergonômica faz com que se tenha uma compreensão de tudo que aconteceu no trabalho, mostrando, principalmente, o desempenho de produção do colaborador e Iida (2005) e Guerrin (2001) sugerem que a AET seja elaborada a partir de cinco etapas: análise da demanda – na qual se descreve a parte da identificação da problemática do sistema, seja em nível gerencial, seja por parte dos colaboradores; também é necessário entender a origem e a dimensão dos problemas identificados; análise da tarefa – em que se avaliam os procedimentos executados pelos colaboradores, que devem estar documentados por escrito. Essa análise objetiva descobrir as discrepâncias entre o que é prescrito de maneira formalizada e o que é realmente executado; análise da atividade - aqui são caracterizados os comportamentos dos colaboradores ao realizar determinada tarefa.; diagnóstico – a partir das análises com as ferramentas selecionadas; caderno de recomendações – com as prescrições para mitigação ou extinção dos problemas e riscos, o fluxo metodológico é apresentado na Figura 1.

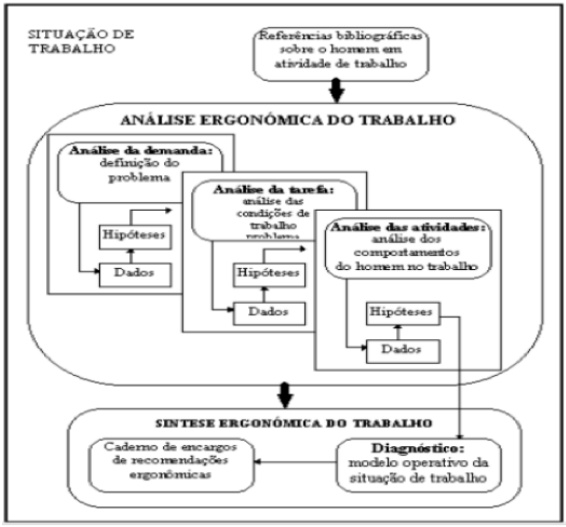


Figura 1. Método da AET

Fonte: Adaptado de Silva (2001) apud Onuka et al (2011)

Ferramentas Ergonômicas e a análise do Risco Biomecânico

Na prática, a avaliação ergonômica do trabalho é realizada através de métodos/ ferramentas e normas, que consideram um grupo de condições de trabalho e um foco específico, melhor definido por Másculo e Vidal (2011): “O método ergonômico consiste no uso de recursos dos campos de conhecimento que possibilitem averiguar, levantar, analisar e sistematizar o trabalho e suas condições, através de instrumentos qualitativos e quantitativos”. Essa definição é alinhada com o significado da palavra “método”, definindo-o como o conjunto dos meios dispostos convenientemente para alcançar um fim e chegar a um conhecimento científico (MICHAELIS, 2009).

Na perspectiva biomecânica, os riscos caracterizam-se pelo levantamento de cargas, frequência, duração e intensidade de execução das tarefas, repetitividade, uso excessivo de força, vibrações, compressões mecânicas, geralmente associadas com posturas inadequadas. Moffat & Vickery (2002) afirmam que diversos tipos de trabalho podem representar riscos consideráveis de lesões musculoesqueléticas às costas, por distensão ou excesso de uso e por exigir muitas vezes que órgãos e tecidos fiquem expostos a fatores que colocam tensões mecânicas, principalmente dos músculos e das articulações (GROZDANOVIĆ, 2002).

REBA – AVALIAÇÃO RÁPIDA DO CORPO INTEIRO

REBA é um método desenvolvido para avaliar posturas de trabalho imprevisíveis e foi baseado no RULA, OWAS e NIOSH. Desenvolvido por Sue Hignett e Lynn McAtmney, foi publicado na *Applied Ergonomics* em 2000 (BAÚ, 2002).

Para STANTON et al.(2016) esta ferramenta coleta dados sobre a postura corporal, forças utilizadas, tipo de movimentação ou ação, repetição e associações. A pontuação final REBA oferece uma indicação do nível de risco e urgência com a qual alguma providencia deve ser realizada. O REBA foi desenvolvido para ser utilizado como uma ferramenta conduzida por evento em razão da complexidade para coletar dados.

As técnicas que se utilizam para realizar uma análise postural têm duas características que são a sensibilidade e a generalidade. Uma alta generalidade quer dizer que é aplicável em muitos casos, mas provavelmente tenha uma baixa sensibilidade, quer dizer que os resultados que se obtenham podem ser pobres em detalhes. Porém as técnicas com alta sensibilidade, onde é necessária uma informação muito precisa sobre os parâmetros específicos que se medem, parecem ter uma aplicação bastante limitada (COLOMBINI, 2005)

A avaliação de risco também é feita a partir de uma observação sistemática dos ciclos de trabalho, pontuando as posturas do tronco, pescoço, pernas, carga, braços, antebraços e punhos em tabelas específicas para cada grupo. Após a pontuação de cada grupo é obtido a pontuação final onde se compara com uma tabela de níveis de risco e ação em escala que varia de 0 (zero), correspondente ao intervalo de movimento ou postura de trabalho aceitável e que não necessita de melhorias na atividade até ao valor 4 (quatro) onde o fator de risco é considerado muito alto sendo necessário atuação imediata. Conforme apresentado na tabela 1.

Pontuação REBA	Nível de risco	Nível de ação	Ação (incluindo avaliação aprofundada)
1	Insignificante	0	Não necessária
2-3	Baixo	1	Pode ser necessária
4-7	Médio	2	Necessária
8-10	Alto	3	Necessária em breve
11-15	Muito alto	4	Necessária imediatamente

Tabela 1: Pontuação do REBA

Fonte: STANTON, N.et al (2016)

KIM - ANÁLISE DO RISCO DE MOVIMENTAÇÃO MANUAL DE CARGAS - ELEVAR/ABAIXAR

É utilizado para avaliar tarefas que envolvem operações de movimentação manual (DOUWES, KRAKER, 2014).

Este método realiza a descrição da tarefa e a avalição separadamente, quando os itens chaves são pontuados sem necessitar de medições exatas (imprecisão calculada) Segundo o ETUI - Instituto Sindical Europeu (2014), duas ferramentas KIM foram desenvolvidas para a avaliação dos riscos no caso de tarefas de: levantar, manter, colocar; e empurrar ou puxar uma carga. Considera o número de levantamentos ou transporte de carga por dia de trabalho, a sua duração total no dia (<5s) e a distancia total percorrida no transporte da carga.

A análise de risco é baseada na soma entre três fatores tais como a pontuação da carga, pontuação da postura, posição da carga e pontuação das condições de trabalho, o resultado desses fatores e multiplicado com a pontuação do tempo e gerando o resultado pela ferramenta KIM.

NIOSH - NATIONAL INSTITUTE OF OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH

Método que avalia a carga levantada pelos colaboradores sem causar lesões, foi concebido em 1981, e revisado ao longo dos anos, tornando-se uma equação que fornece parâmetros para a avaliação de tarefas de levantamento assimétrico de cargas e levantamento de objetos com pegas não ideias com ambas as mãos (ERGO, 2006). O NIOSH considera:

RWL ou LPR: Limite de Peso Recomendado, ou seja, o peso da carga suportada por colaboradores sadios num período de tempo, sob determinadas condições, sem aumentar o risco de lombalgia. Sua fórmula considera a distância horizontal entre o indivíduo e a carga, a distância vertical entre ambos, o deslocamento, o ângulo de assimetria, a frequência média de levantamentos e a qualidade da pega, conforme a tabela 2.

A equação do RWL ou LPR = LC x HM x VM x DM x AM x FM x CM

Carga Constante	LC	23 kg
Distância do indivíduo à carga	HM	(25 / H)
Distância do local de pega ao chão	VM	1 - (0,003 x | V - 75 |)
Distância vertical da origem ao destino	DM	0,82 + (4,5 / D)
Ângulo de Rotação lateral do tronco	AM	1 - (0,0032 x A)
Frequência de levantamento / mir	FM	Tabela 1
Qualidade da Pega	CM	Tabela 2

Tabela 2: RWL ou LPR da NIOSH

Fonte: WATERS, T. et. Al 1994

IL ou LI: Índice de Levantamento fornece uma estimativa do nível de estresse físico em levantamento manual. Terminologia e Definições de Dados: Define os parâmetros do levantamento, peso da carga, distância horizontal, altura vertical, altura vertical percorrida, ângulo de assimetria, posição do corpo, frequência e duração do levantamento, classificação da pega e controle motor significativo.

A equação do LI (Índice de Levantamento): é L (peso real do objeto) multiplicado pelo o resultado do RWL ou LPR (Limite de Peso Recomendado). Os resultados são: Baixo Risco (LI < 1), Risco Moderado (1 <= LI < 2) e Alto Risco (LI >= 2).

Com a aplicação da NIOSH o analista consegue calcular a carga ideal para determinada função, prevenindo o colaborador de possíveis lesões decorrentes de levantamento de cargas excessivas.

ESTUDO DE CASO

Aplicação da AET

Análise da Demanda

No ambiente de trabalho estudado, situam-se o total de 50 postos de operação de injeção plástica, em que atuam a cada duas máquinas um operador. As reclamações decorrentes da operação deste posto tratam de situações como: desconfortos ao agachar para dispor em consequência de não utilizarem postura correta, ao retirar as caixas, fadiga, dificuldade de realização de atividades dentro do envoltório acional, movimentacionais, físico-ambientais, operacionais. A ocorrência dessas reclamações aconteceu no período de 8 meses, sendo registradas no posto de SST da empresa em questão. A demanda foi apreciada e pelo conhecimento prévio do posto e da atividade realizada no mesmo, sendo

cogitadas hipóteses iniciais das motivações para essas ocorrências: transporte de cargas e levantamento de peso. Em função destas hipóteses, as ferramentas foram selecionadas e a aplicação das mesmas realizadas *in loco*, para caracterização dos problemas enfrentados pelo operador. Na organização do trabalho temos a seguintes informações: **Carga Horária efetiva de Trabalho**: 480min; **Produção por hora:** 12 caixas por hora em cada máquina; **Tempo Ciclo:** Atividade acíclica; **Ritmo de trabalho:** Razoável.

Análise da Tarefa e Análise da Atividade

As atribuições do operador, no seu posto de trabalho são definidas por tais atividades:

I. Operação da maquina injetora e retirar caixas dos carrosséis (12 por hora).

II. Abastecimento de matéria prima

III. Retirada das caixas de matéria prima da máquina

IV. Levar caixas de matéria prima até o palete

V. Realizar inspeção na saída da esteira e em bancadas móveis (a cada hora) e realizar laudos de inspeção a cada 1 hora e preencher controles de mão de obra.

No quadro 1, abaixo se correlacionam as atividades e tarefas realizadas no posto em avaliação.

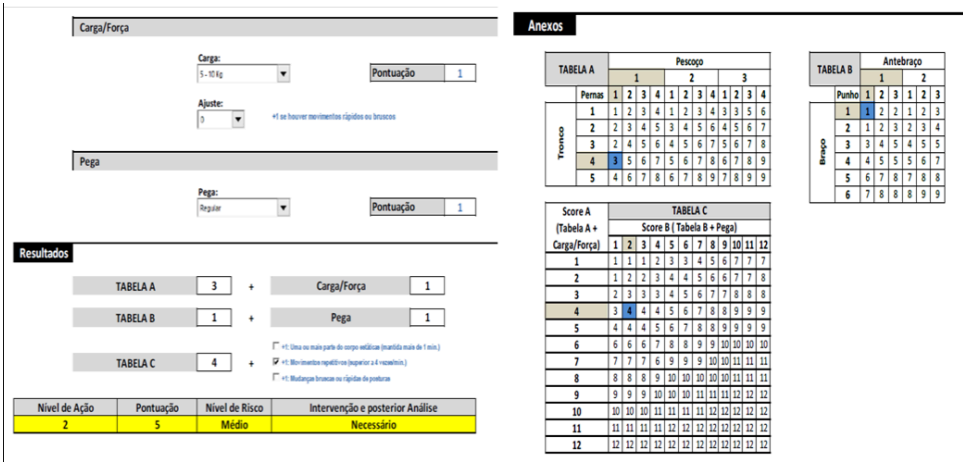
TAREFA	REGISTRO VISUAL	DEMANDA BIOMECÂNICA	ATIVIDADE
Operação da maquina injetora e Retirada de 5 unidades de caixas do carrossel e empilhamento no chão.		Demanda pega palmar fechada com flexão de cotovelo e extensão de punho ao manusear o objeto.	Realiza cerca de 12 vezes por hora em cada máquina e empilha no suporte com rodizio.
Abastecimento de matéria- prima.		Demanda flexão de cotovelo ao transferir a caixa com discreta inclinação de tronco.	Antes posiciona uma caixa grande vazia na pilha para despejar o conteúdo da caixa pequena.
Retirada das caixas de matéria prima da máquina Retirada das caixas da máquina de esteira.		Demanda manuseio de carga com flexão e rotação de tronco.	Posiciona as caixas já em carro transportador.
Levar e posicionar as caixas de matéria prima até o palete. Posicionamento das caixas em palete.		Força de empurrar as caixas no carro, pisa com um pé para inclinar os carros e caixa para empurrar e deslizar pelo palete.	Carro não possui local para pega.
Realizar inspeção na saída da esteira e em bancadas móveis (a cada hora) e realizar laudos de inspeção a cada 1 hora e preencher controles de mão de obra.		Flexão do tronco para coletar as amostras.	Carro não possui local para pega.

Quadro 1. Analise Ergonômica do posto

RESULTADOS

Na ferramenta REBA, na qual o grupo A corresponde ao tronco, pescoço e pernas foram encontrados os seguintes resultados: ao executar uma flexão >60º de tronco, com o pescoço 0 a 20º na flexão, e pernas na posição de suportar o peso bilateralmente deambulando. No grupo B, que engloba braços, antebraços e punhos, a avalição apontou no braço 20º graus de extensão à 20 graus de flexão, no antebraço 60º à 100º, punhos 0 º à 15 º de flexão-extensão, com carga de 9,5kg, com a pega regular.

Ao realizar a interseção das informações da Tabela do grupo A, com resultado 3, e do grupo B, com resultado 1, totaliza-se na tabela C o indicador de carga/força/pega em nível 4. O resultado do nível de esforço de risco aponta o nível de ação 2, cujo risco é de média gravidade e sugere intervenção adequada.



Carga/Força

Carga: 5 - 10 Kg — Pontuação 1

Ajuste: 0 — +1 se houver movimentos rápidos ou bruscos

Pega

Pega: Regular — Pontuação 1

Resultados

TABELA A	3	+	Carga/Força	1
TABELA B	1	+	Pega	1
TABELA C	4	+		

☐ +1: Uma ou mais parte do corpo estáticas (mantida mais de 1 min.)
☑ +1: Movimentos repetitivos (superior a 4 vezes/min.)
☐ +1: Mudanças bruscas ou rápidas de posturas

Nível de Ação	Pontuação	Nível de Risco	Intervenção e posterior Análise
2	5	Médio	Necessário

Anexos

TABELA A	Pescoço											
	1				2				3			
Pernas	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Tronco 1	1	2	3	4	1	2	3	4	3	3	5	6
Tronco 2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7
Tronco 3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
Tronco 4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
Tronco 5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9

TABELA B	Antebraço					
	1			2		
Punho	1	2	3	1	2	3
Braço 1	1	2	2	1	2	3
Braço 2	1	2	3	2	3	4
Braço 3	3	4	5	4	5	5
Braço 4	4	5	5	5	6	7
Braço 5	6	7	8	7	8	8
Braço 6	7	8	8	8	9	9

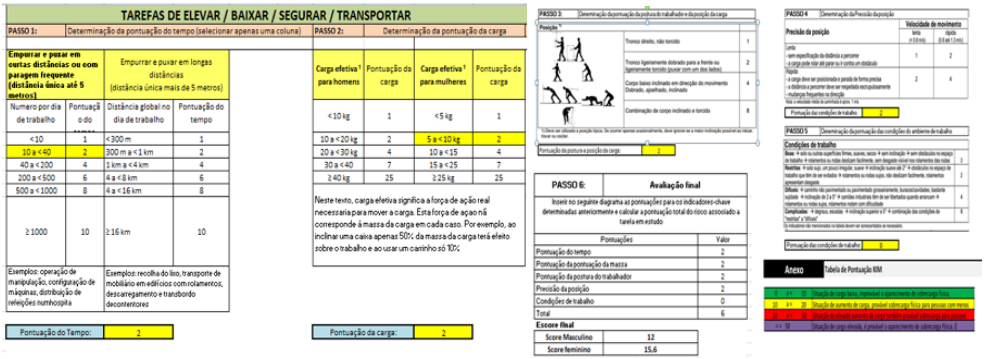
Score A (Tabela A + Carga/Força)	TABELA C Score B (Tabela B + Pega)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7
2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8
3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8
4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9
5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10
7	7	7	7	6	9	9	9	10	10	11	11	11
8	8	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11	11
9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12
11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Figura 2 – Aplicação da Ferramenta REBA

Na ferramenta KIM, no passo 1 no item de empurrar e puxar em curtas distâncias ou com paragem frequente (distância única até 5 metros) com o número por dia de trabalho 10 a <40 número por dia de trabalho com a pontuação igual a 2, no passo 2 cita a determinação da pontuação da carga como são de 9,5 kg, carga efetiva para mulheres 5 a < 10kg resultando a pontuação da carga igual a 2, no passo 3 consta a determinação da pontuação da postura do colaborador e da posição da carga que o tronco ligeiramente dobrado para frente que fica igual a 2, no passo 4 é a determinação da precisão da posição que é rápida e com velocidade lenta com resultado 2, no passo 5 a determinação da pontuação das condições do ambiente de trabalho é boa resultando 0.

O resultado é obtido somando as variáveis (pontuação da carga (2)+ postura do colaborador e da posição da carga (2) + precisão da posição (2) + Condições de trabalho (0) = este resultado 6 é multiplicado com a variável tempo (2) que o score final feminino 15,6 com 10 a < 20 situação de aumento de carga, provável sobrecarga física para pessoas com menos, com risco moderado, podendo ocasionar riscos biomecânicos no tronco.

Devido esta aplicação da ferramenta foi percebido que há uma situação de aumento de carga, provável sobrecarga física para pessoas com menos força. Para este grupo é útil recomendações ergonômicas para reduzir esta sobrecarga biomecânica no tronco durante o transporte da carga e sugere intervenção adequada para esta atividade.



TAREFAS DE ELEVAR / BAIXAR / SEGURAR / TRANSPORTAR

PASSO 1: Determinação da pontuação do tempo (selecionar apenas uma coluna)

Empurrar e puxar em curtas distâncias ou com paragem frequente (distância única até 5 metros)		Empurrar e puxar em longas distâncias (distância única mais de 5 metros)	
Numero por dia de trabalho	Pontuação do tempo	Distância global no dia de trabalho	Pontuação do tempo
<10	1	<300 m	1
10 a <40	2	300 m a < 1 km	2
40 a <200	4	1 km a < 4 km	4
200 a < 500	6	4 a < 8 km	6
500 a < 1000	8	4 a < 16 km	8
≥ 1000	10	≥ 16 km	10
Exemplos: operação de manipulação, configuração de máquinas, distribuição de refeições numhospital		Exemplos: recolha do lixo, transporte de mobiliário em edifícios com rolamentos, descarregamento e transbordo decontentores	

Pontuação do Tempo: 2

PASSO 2: Determinação da pontuação da carga

Carga efetiva[1] para homens	Pontuação da carga	Carga efetiva[1] para mulheres	Pontuação da carga
< 10 kg	1	< 5 kg	1
10 a < 20 kg	2	5 a < 10 kg	2
20 a < 30 kg	4	10 a < 15	4
30 a < 40	7	15 a < 25	7
≥ 40 kg	25	≥ 25 kg	25

Neste texto, carga efetiva significa a força de ação real necessária para mover a carga. Esta força de aço nã corresponde à massa da carga em cada caso. Por exemplo, ao inclinar uma caixa apenas 50% da massa da carga terá efeito sobre o trabalho e ao usar um carrinho só 10%

Pontuação da carga: 2

PASSO 3: Determinação da pontuação da postura do trabalhador e da posição da carga

Posição *

Tronco direito, não torcido	1
Tronco ligeiramente dobrado para a frente ou ligeiramente torcido (puxar com um dos braços)	2
Corpo baixo inclinado em direção do movimento Dobrado, ajoelhado, inclinado	4
Combinação de corpo inclinado e torcido	8

* Deve ser utilizada a posição típica. Se ocorrer apenas ocasionalmente, deve ignorar se a maior inclinação possível ao nível. Inverte no verão

Pontuação da postura e posição da carga: 2

PASSO 4: Determinação da Precisão da posição

Precisão da posição	Velocidade de movimento lenta (< 0,8 m/s)	rápida (0,8 até 1,5 m/s)
Lenta - sem especificação da distância a percorrer - a carga pode rolar até parar ou ir contra um obstáculo	1	2
Rápida - a carga deve ser posicionada de forma precisa - a distância a percorrer deve ser respeitada escrupulosamente - mudanças frequentes na direção	2	4

Nota: a velocidade média de caminhada é aprox. 1 m/s

Pontuação das condições de trabalho: 2

PASSO 5: Determinação da pontuação das condições do ambiente de trabalho

Condições de trabalho

Gaus: + sólo ou outras superfícies firmes, suaves, secos + sem inclinação + sem obstáculos no espaço de trabalho + ótimamente ou não deslizam facilmente, sem despejos nível nos ritamentos das rodas	2
Rasntes: + sólo suja, um pouco irregular, suave + inclinação suave até 2° + obstáculos no espaço de trabalho que têm de ser evitados + ótimamente ou rodas suja, não deslizam facilmente, ritamentos aproximar despejos	2
Difíceis: + carreiro não pavimentado ou pavimentado grosseiramente, buracos/ondulades, bastante suja/sole + inclinação de 2 até 5° + carrinho industrial tém de ser diertados quando arranjam + ritamentos ou rodas suja, ritamentos rodam com dificuldade	4
Complicados: + lágrimas, escadas + inclinação superior a 5° + combinação das condições de "difícil" e "difícil" Os trabalhadores não necessitam ou não devem ser arrasantados ao necessário	8

Pontuação das condições de trabalho: 2

PASSO 6: Avaliação final

Inserir no seguinte diagrama as pontuações para os indicadores-chave determinadas anteriormente e calcular a pontuação total do risco associado a tarefa em estudo

Pontuações	Valor
Pontuação do tempo	2
Pontuação da pontuação da massa	2
Pontuação da postura do trabalhador	2
Precisão da posição	2
Condições de trabalho	0
Total	6

Escore final

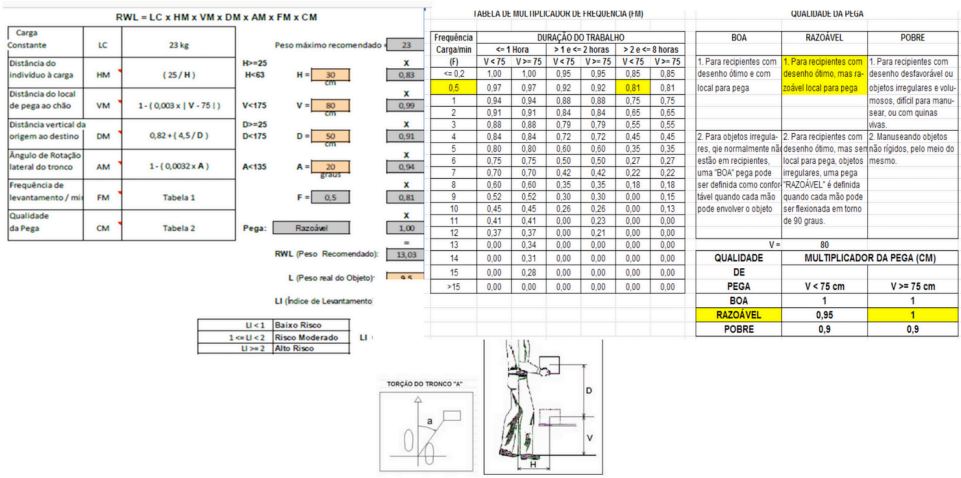
Score Masculino	12
Score feminino	15,6

Anexo Tabela de Pontuação KIM

0	a <	20	Situação de carga baixa, improvável o aparecimento de sobrecarga física
20	a <	30	Situação de aumento de carga, provável sobrecarga física para pessoas com menos
30	a <	50	Situação de elevado aumento de carga também provável sobrecarga para pessoas
> =	50		Situação de carga elevada, é provável o aparecimento de sobrecarga física

Figura 3 – Aplicação da Ferramenta KIM

Na ferramenta da NIOSH foram coletadas as medidas necessárias com uso da trena para reunir as seguintes médidas: H (distância do individuo a pega) = 30 cm, V (distância do local de pega ao chão) = 80cm, D (distância vertical da origem do destino da caixa) = 50 cm, A (ângulo de rotação) = 20 º, F (frequência carga /minuto) = 0,5, considerando uma pega razoável e L(Peso real do objeto) = 9,5 kg



RWL = LC x HM x VM x DM x AM x FM x CM

Carga Constante	LC	23 kg			Peso máximo recomendado =	23
Distância do individuo à carga	HM	(25 / H)	H<=25 H<63	H = 30 cm	X	0,83
Distância do local de pega ao chão	VM	1 - (0,003 x | V - 75 |)	V<175	V = 80 cm	X	0,99
Distância vertical da origem ao destino	DM	0,82 + (4,5 / D)	D>=25 D<175	D = 50 cm	X	0,91
Ângulo de Rotação lateral do tronco	AM	1 - (0,0032 x A)	A<135	A = 20 graus	X	0,94
Freqüência de levantamento / mi	FM	Tabela 1		F = 0,5	X	0,81
Qualidade da Pega	CM	Tabela 2	Pega:	Razoável	X	1,00
					=	
			RWL (Peso Recomendado):			13,03
			L (Peso real do Objeto):			9,5
			LI (Índice de Levantamento			

LI < 1	Baixo Risco
1 <= LI < 2	Risco Moderado
LI >= 2	Alto Risco

TABELA DE MULTIPLICADOR DE FREQUENCIA (FM)

Frequência Carga/min (F)	DURAÇÃO DO TRABALHO <= 1 Hora V < 75	<= 1 Hora V >= 75	> 1 e <= 2 horas V < 75	> 1 e <= 2 horas V >= 75	> 2 e <= 8 horas V < 75	> 2 e <= 8 horas V >= 75
<= 0,2	1,00	1,00	0,95	0,95	0,85	0,85
0,5	0,97	0,97	0,92	0,92	0,81	0,81
1	0,94	0,94	0,88	0,88	0,75	0,75
2	0,91	0,91	0,84	0,84	0,65	0,65
3	0,88	0,88	0,79	0,79	0,55	0,55
4	0,84	0,84	0,72	0,72	0,45	0,45
5	0,80	0,80	0,60	0,60	0,35	0,35
6	0,75	0,75	0,50	0,50	0,27	0,27
7	0,70	0,70	0,42	0,42	0,22	0,22
8	0,60	0,60	0,35	0,35	0,18	0,18
9	0,52	0,52	0,30	0,30	0,00	0,15
10	0,45	0,45	0,26	0,26	0,00	0,13
11	0,41	0,41	0,00	0,23	0,00	0,00
12	0,37	0,37	0,00	0,21	0,00	0,00
13	0,00	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00
>15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

QUALIDADE DA PEGA

BOA	RAZOÁVEL	POBRE
1. Para recipientes com desenho ótimo e com local para pega	1. Para recipientes com desenho ótimo, mas razoável local para pega	1. Para recipientes com desenho desfavorável ou objetos irregulares e volumosos, difícil para manusear, ou com quinas vivas.
2. Para objetos irregulares, qie normalmente não estão em recipientes, uma "BOA" pega pode ser definida como confortável quando cada mão pode envolver o objeto	2. Para recipientes com desenho ótimo, mas sem local para pega, objetos irregulares, uma pega "RAZOÁVEL" é definida quando cada mão pode ser flexionada em forno de 90 graus.	2. Manuseando objetos não rígidos, pelo meio do mesmo.

V = 80

QUALIDADE DE PEGA	MULTIPLICADOR DA PEGA (CM) V < 75 cm	V >= 75 cm
BOA	1	1
RAZOÁVEL	0,95	1
POBRE	0,9	0,9

TORÇÃO DO TRONCO "X"

Figura 4 – Aplicação da Ferramenta NIOSH

A utilização do NIOSH teve por intuito calcular o limite de peso recomendado do colaborador (RWL ou LPR) resultou 13,03kg, então para calcular o índice de levantamento (IL ou LI) = o peso real do objeto (L) dividido pelo resultado encontrado pelo RWL ou LPR que encontrou o LI =0,73 que na escala é um risco baixo para o colaborador, ou seja, baixo risco biomecânico no levantamento das caixas de matéria-prima.

DISCUSSÃO

Após análise dos resultados aferidos com o auxilio das ferramentas ergonômicas aplicadas, evidenciou-se de forma isolada e agrupada, que há a incidência de risco moderado no posto analisado, sobretudo, quanto ao manuseio de cargas com peso e frequência considerável.

FERRAMENTA UTILIZADA	APLICAÇOES	RESULTADO
REBA	Avaliação do corpo inteiro	Moderado Risco Ergonômico
KIM – Elevar/Abaixar	Análise do risco de movimentação manual de cargas - Elevar/Abaixar	Moderado Risco Ergonômico
NIOSH	Levantamento de cargas	Baixo Risco Ergonômico

Tabela 3: Resultado das Ferramentas utilizadas

Fonte: Do próprio autor

A preocupação com questões ergonômicas e com a postura de trabalho remonta à antiguidade, na qual o ser humano, constantemente, procurou desenvolver ferramentas e formas de trabalho que fossem práticas e que não prejudicassem quem as utilizasse (FIDELIS; FERNANDES, 2015).

Grandjean (1998) menciona que o manuseio em determinadas posições, particularmente tendo que pegar a carga no chão, no palete ou na esteira aumenta substancialmente a incidência de riscos biomecânicos que podem ter consequências possíveis como lombalgia (FILHO E JUNIOR; LABORE, Saúde Ocupacional). Em relações comparativas entre ferramentas NIOSH, KIM, REBA a sobrecarga ocorre, sobretudo na região lombar e membros superiores.

Portanto, deve-se verificar a possibilidade de inserção das melhorias recomendadas, conforme preconiza a metodologia da AET utilizada nesse estudo de caso. Dessa forma o ponto mais significante do trabalho são as recomendações, que podem realmente causar um impacto positivo no posto, tendo em vista que cada uma delas objetiva abordar um risco biomecânico resultante da avaliação do posto com aplicações das ferramentas mencionado na AET.

TAREFA	DEMANDA BIOMECÂNICA	FERRAMENTA/ RISCO	RECOMENDAÇÃO
Operação da maquina injetora e Retirada de 5 unidades de caixas do carrossel e empilhamento no chão.	Demanda pega palmar fechada com flexão de cotovelo e extensão de punho ao manusear o objeto.	NIOSH – BAIXO REBA – MODERADO	Carro pantográfico hidráulico e/ou palete de elevação. Dispor de suporte regulável com altura mínima de pega no posicionamento das caixas em 75 cm, e máximo de 140 de empilhamento.
Abastecimento de matéria- prima.	Demanda flexão de cotovelo ao transferir a caixa com discreta inclinação de tronco.	REBA – MODERADO NIOSH – BAIXO	Carro pantográfico hidráulico
Retirada das caixas de matéria prima da máquina Retirada das caixas da máquina de esteira.	Demanda manuseio de carga com flexão e rotação de tronco.	NIOSH – BAIXO REBA – MODERADO KIM - MODERADO	Um dispositivo de elevação da esteira no momento da retirada assim evitando a flexão e rotação do tronco.
Levar e posicionar as caixas de matéria prima até o palete. Posicionamento das caixas em palete.	Força de empurrar as caixas no carro, pisa com um pé para inclinar os carros e caixa para empurrar e deslizar pelo palete.	KIM – MODERADO REBA – MODERADO	Criar local de pega para carro transportador.
Realizar inspeção na saída da esteira e em bancadas móveis (a cada hora) e realizar laudos de inspeção a cada 1 hora e preencher controles de mão de obra.	Flexão do tronco para coletar as amostras.	KIM – MODERADO REBA – MODERADO	Realizar Treinamento indicando as melhores posturas para execução das tarefas.

Tabela 4: Ferramentas aplicadas x riscos encontrados x recomendações

Fonte: Do próprio autor

CONCLUSÃO

São muitas as ferramentas, métodos e normas de ergonomia disponíveis a fim de auxiliar no processo de avaliação ergonômica do trabalho, sendo complexo definir as mais adequadas, sendo esta afirmação reforçada por Iida (2005).

As ferramentas ergonômicas auxiliam na identificação de cargas de trabalho que podem causar lesões musculoesqueléticas ao colaborador. Essas lesões podem ser causadas por diversos motivos, dentre eles os movimentos repetitivos, posturas inadequadas, fadiga, transporte de cargas excessivas, intensificação do trabalho entre outros. Por meio dessas ferramentas é possível diagnosticar as situações que mais prejudicam a saúde do colaborador e também apontam o grau de criticidade que o mesmo está submetido em cada atividade (SHIDA; BENTO, 2012).

Dessa forma, foram utilizadas três ferramentas ergonômicas, na qual se acredita que estas, abrangem os quesitos para um diagnóstico preciso do colaborador em seu posto de injeção plástica, sendo essas: REBA, KIM, NIOSH.

Esse estudo apontou que o estudo ergonômico do posto de trabalho de operação de injeção plástica, conforme a AET , avalia de forma efetiva os riscos biomecânicos presentes na atividade do colaborador. Também em função da complementação com o uso das ferramentas REBA, KIM, NIOSH, pode-se constatar que tais metodologias de análise contribuem significativamente para quantificar os riscos e auxiliam na identificação de cargas de trabalho. Ao usar as ferramentas ergonômicas a combinação desses métodos, a AET aumentar a fidelidade dos resultados e, consequentemente, gerar adequações ergonômicas mais eficientes.

Nesse sentido, os acompanhamentos pelos setores da empresa responsável com comitê ergonômico interno, juntos abrangeriam a observação de forma contínua a fim de reduzir os riscos biomecânicos resultando a melhora da saúde e produtividade do colaborador.

REFERENCIAS

BAÚ, L. M. S.; **Fisioterapia do Trabalho**: Ergonomia, Legislação, Reabilitação. Curitiba: Clãdosilva, 2002.

COLOMBINI, Daniela. et al. Il **método ocra per l´analisi e la prevenzione del rischio da movimenti ripetuti**. Milão: FrancoAngeli, 2005.

DOUWES, M., KRAKER, H. de. **Development of a non-expert risk assessment method for hand-arm related tasks (HARM).** International Journal of Industrial Ergonomics, v.44, p.316-327. Março de 2014.

ERGO, Cadernos. **Gestão da Qualidade no PCMSO. Equação do NIOSH para Levantamento Manual de Cargas**. Ergo Editora Ltda. **Ergonomia, Saúde e Segurança** - n.1, out./dez. 2006.

ETUI – Instituto Sindical Europeu. **Guia: classificação dos métodos de avaliação e/ou prevenção dos riscos de Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho (DORT).**2014.

FERREIRA, M. S; RIGHI, C. A. R. **Análise Ergonômica do trabalho**. Março, 2009.

FIDELIS, Nayara Vargas Witcel; FERNANDES, Carlos Aparecido; **Análise ergonômica do trabalho de um operador de torno mecânico em uma universidade do Paraná.** XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Fortaleza - Ceará. 2015.

FILHO, Sinval Alves da Silva ;JUNIOR, Sérgio C. Bogado;. Descrição dos Processos de Trabalho - Setor: Soldagem. Belo Horizonte. Labore –Saúde Ocupacional.

GRANDJEAN, Etienne. **Manual de Ergonomia - Adaptando o Trabalho ao Homem**. 4o . Edição. Porto Alegre. Editora Artes Médicas Sul Ltda. 1998.

GÜÉRIN, F. et al. **Compreender o trabalho para transformá-lo: a prática da ergonomia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2001

GROZDANOVIC, M. **Human activity and musculoskeletal injuries and disorders. Medicine and Biology**. 9(2):150-156, 2002.

HUGHES, Richard E.; NELSON, Nancy A**. Estimating investment worthiness of an ergonomic intervention for preventing low back pain from a firm's perspective**. Applied Ergonomics, v. 40, n. 3, p. 457–463, 2009.

International Ergonomics Association - IEA Disponível em: https://www.iea.cc/whats/index.html. Acesso em: 04 de Outubro de 2019.

IIDA, I. **Ergonomia: projeto e produção**. 2ª Ed. São Paulo. Edgar Blücher, 2005

MÁSCULO, Francisco Soares. VIDAL, Mario Cesar, (Orgs). **Ergonomia: trabalho adequado e eficiente**. Rio de Janeiro: Elsevier / ABEPRO 2011.

MENEZES, M. de L.; SANTOS, I. J. A. L**. Avaliação das condições de trabalho no setor industrial: Uma abordagem centrada na ergonomia física e organizacional do trabalho.** 2014.

MERINO, E. ***Ergonomia.*** Florianópolis - Universidade Federal de Santa Catarina, 2008

MICHAELIS. **Dicionário de português online**. Editora Melhoramentos, 2009.

MILES, Angela. K.; PERREWE, Pamela. L. **The Relationship Between Person–Environment Fit, Control, and Strain: The Role of Ergonomic Work Design and Training**. Journal of Applied Social Psychology, 2011, 41, 4, p. 729–772 (2011).

MOFFAT, M.; VICKERY, S. **Manual de Manutenção e Reeducação Postural da American Physical Association.** Tradução: Walkiria Settineri. Porto Alegre/ São Paulo: Artmed Editora, 2002.

ONUKA, ET AL. **Análise ergonômica postural do posto de trabalho do servente na construção civil**. In VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão. 2011.

SHIDA, G. J.; BENTO, P. E. G. **Métodos e Ferramentas ergonômicas que auxiliam na análise nas situações de trabalho**.In VIII Congresso Nacional de Excelência em Gestão. 2012

STANTON, N.;HEDGE, A.;BROOKHUIS,K.;SALAS,E.;HENDRICK,H.**Manual de Fatores Humanos e Metodos Ergonomicos.**1.ed.-São Paulo: Phorte, 2016.

WATERS, T. R., PUTZ-ANDERSON, V., GARG, A. Applications Manual for the Revised NIOSH Lifting Equation. DHHS (NIOSH) Publication. No. 94-110. 1994.

CAPÍTULO 15

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DESCARGA PARA VERTEDORES: ESTUDO EM LABORATÓRIO

Data de submissão: 06/02/2024 *Data de aceite: 01/04/2024*

Larissa Ayumi Namie
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Apucarana, Departamento de Engenharia Civil. Apucarana – Paraná.
http://lattes.cnpq.br/5053711813302027

Pedro Henrique Donato Aporta,
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Apucarana, Departamento de Engenharia Civil. Apucarana – Paraná.
http://lattes.cnpq.br/0283243900801099

Andrea Sartori Jabur
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Apucarana, Departamento de Engenharia Química. Apucarana – Paraná.
http://lattes.cnpq.br/0460678668447420

RESUMO: vertedores são paredes ou aberturas, onde um fluido escoa sobre as mesmas e são utilizados intensamente para medir e/ou controlar a vazão em escoamento de um canal hidráulico, como as barragens. O presente trabalho teve como objetivo comparar quais são os coeficientes de descarga encontrados literatura teórica com os medidos na prática, em um canal hidráulico reduzido. Para o levantamento de dados fez-se necessário realizar medições em laboratório de Transferência de Calor e Massa/Hidráulica, da UTFPR – Campus Apucarana-PR, com vertedores de forma retangular e triangular de parede delgada, onde apresentam uma espessura mais fina em relação ao seu comprimento, colocados perpendicularmente ao fluxo do escoamento. Formando assim, uma elevação do nível d'água a montante até o fluido desaguar sobre os vertedores. Diante disso, foram realizadas medições no canal hidráulica, encontrando uma sutil diferença entre o valor encontrado na prática com existente na literatura. Comprovando-se as formulações de Thomson e Francis, para o vertedor triangular e retangular, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: coeficiente de descarga; hidráulica; vertedor.

DETERMINATION OF THE DISCHARGE COEFFICIENT FOR SPILLWAYS: LABORATORY STUDY

ABSTRACT: Spillways are walls or openings, where a fluid flows over them and are used intensively to measure and/or control the flow in flow of a hydraulic channel, such as dams. The present study aimed to compare what are the discharge coefficients found in the theoretical literature with those measured in practice, in a reduced hydraulic channel. For data collection it was necessary to perform measurements in the laboratory of Heat Transfer and Mass/Hydraulics, from UTFPR- Campus Apucarana-PR, with spillways of rectangular and triangular shape of thin wall, where they present a thinner thickness in relation to their length, placed perpendicular to the flow of the flow. Thus forming an elevation of the water level upstream until the fluid flows over the spillways. Therefore, seis measurements were made in the hydrodynamic channel, finding a subtle difference between the value found in practice and existing in the literature. Proving the formulations of Thomson and Francis, for the triangular and rectangular spillway, respectively.

KEYWORDS: discharge coefficient; hydraulics; Spillway.

INTRODUÇÃO

Vertedores são estruturas hidráulicas utilizadas para controlar a vazão de condutos livres. São importantes em obras como barragens, pois permitem que haja um controle do nível de água no reservatório à montante, e realize a retirada das vazões máximas, em conjunto com o canal extravasor (DANTAS e SILVA, 2016).

De acordo com Azevedo Netto (2015), o estudo de vertedores é de grande importância devido ao uso intenso na medição de vazão de pequenos cursos de água e condutos livres (figura 1), utilizados em estações de tratamento de água (ETAs), assim como no controle de escoamento em galerias e canais. Esse vertedores auxiliam no processo de hidrometria, para canais livres e alguns modelos são indicados para pequenas vazões, pois segundo a NBR 13403/95 os vertedores triangulares oferecem maior precisão para vazões menores que 30 L/s (Lima et al., 2015)

Figura 1: vertedor sem contração instalado em um canal retangular, com função paisagística.

Fonte: Autores 2023.

Conforme a figura 2, as principais partes que compõe um vertedor de acordo com Porto (2006) são:

a. Crista ou soleira é a parte superior da parede, onde a lâmina de água verte.

b. Carga sobre a soleira h é a diferença de cota entre o nível de água a montante e o nível da soleira.

c. Altura do vertedor P é a diferença entre a soleira e o fundo do canal.

d. Largura ou luz da soleira L é a dimensão da soleira onde há presença de escoamento.

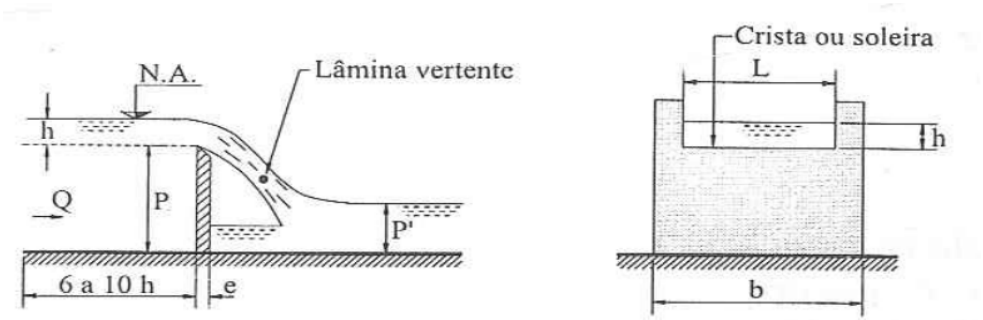


Figura 2 - Vistas lateral e longitudinal de um vertedor de parede delgada.

Fonte: Porto (2006)

Os vertedores podem apresentar diversas formas e disposições, assumindo assim, diferentes comportamentos, existindo então muitos fatores que servem como parâmetro para classificá-los, sendo eles listados a seguir, segundo Azevedo Netto (2015).

Forma geométrica, podendo ser simples (retangulares, trapezoidais, triangulares) ou compostos (seções combinadas).

Altura relativa da soleira, onde são classificados como vertedores completos/livres (P>P') ou vertedores incompletos/afogados (P<P').

Natureza da parede, sendo de parede delgada, quando apresenta a espessura *e* da parede bem mais fina e um comprimento mais elevado em comparação ao vertedor tipo parede espessa ($e > 0{,}66h$).

Largura relativa, onde podem ser sem contrações laterais (L = b) ou vertedores contraídos (L < b), com uma ou duas contrações.

Segundo Tomaz (2013), os principais tipos de vertedores utilizados em pequenas barragens, são vertedores fixos, como os de parede delgada (Figura 3). Podendo assim, separar basicamente a vazão máxima (m³/s) e o coeficiente de descarga.

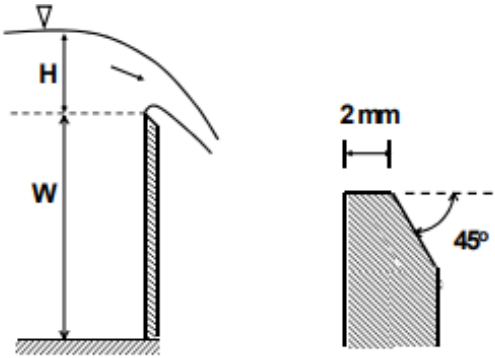


Figura 3 – Vertedor de parede delgada

Fonte: Tomaz (2013)

Sendo:

- $H \geq 100$mm e $W \geq 2H_{max}$, para inibir os efeitos de escala devido à viscosidade e tensão superficial
- Com a crista em formato de faca, com 2mm na horizontal e um chanfro de 45º a jusante

As equações de dimensionamento de vertedores são diferenciadas, conforme a tipologias escolhida. Porém as equações apresentam o coeficiente de descarga, que tem a função de "calibrar" as equações, onde é considerando os efeitos da contração da veia líquida, a rugosidade do material, a diferentes velocidades na veia líquida entre outros, de modo a obter a vazão real e não teórica, para a hidrometria.

Conforme a teoria apresentada em Azevedo Netto (2015), Batispta e Lara (2018), Porto (2006), o coeficiente de descarga teórico é de 0,61 a 0,62, porém ocorrem variações dos valores, devido a diversos fatores como os formatos dos vertedores, a altura da soleira e o nível de água.

O presente trabalho tem como objetivo determinar os coeficientes de descargas de vertedores simples em laboratório, e avaliar os valores obtidos com os valores teóricos, adotados nos dimensionamentos das estruturas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no laboratório de Hidráulica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Apucarana, e visa analisar as correlações entre a carga hidráulica a montante e a respectiva vazão sobre um vertedor de parede delgada, com contrações, na geometria retangular e triangular, como mostra a Figura 4, assim como as dimensões apresentadas em metros. Analisando, assim, os coeficientes de descarga com experimentos práticos em modelos reduzidos para comparar com os modelos presentes na literatura técnica.

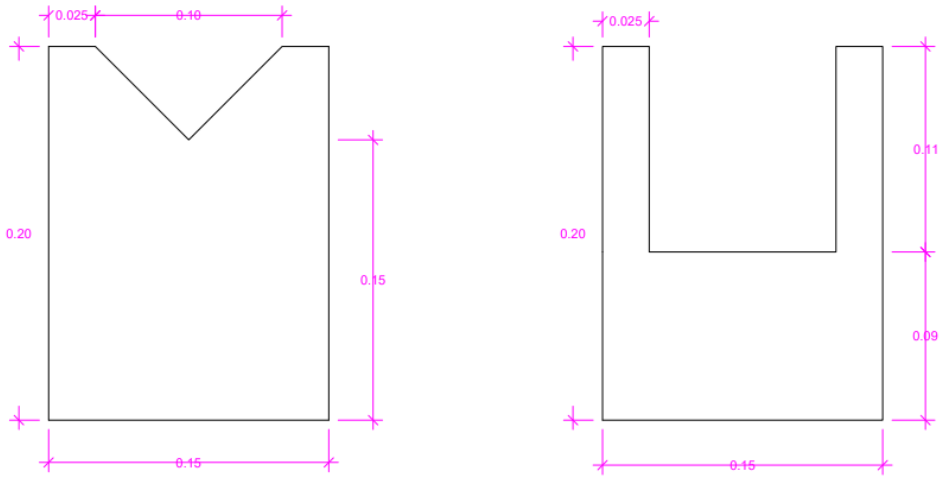


Figura 4 – Vertedor triangular e retangular

Fonte: Autores 2024.

No entanto, ao realizar o experimento, observou-se que o vertedor triangular utilizado funciona como afogado, pois a água verte sobre ele, onde não há presença de contrações laterais, atuando assim, como um vertedor misto triangular com vertedor retangular sem contração.

Para a realização deste experimento foi utilizado um canal hidráulico, composto de um conjunto motor-bomba, de 0,5 cv, onde fornece água de um reservatório (300 L) para o canal aberto com paredes em acrílico transparente (Figura 5). Deste modo, o sistema possibilita, a instalação dos respectivos vertedores, feitos do mesmo material.

Figura 5 – Canal hidráulico

Fonte: Autores (2023)

Para a determinação do coeficiente de descarga foram utilizadas Eq. (1) e (2), derivadas das formulações de Francis e Thomson para o cálculo de vazão de vertedores retangulares com 2 contrações (Eq. 1) e vertedores triangulares (Eq. 2), respectivamente (Baptista, Lara, 2016; Almeida et. al, 2016). No entanto, essas são equações simplificadoras, onde desprezam diversas hipóteses como efeito da viscosidade, tensão superficial, rugosidade da parede do vertedor entre outras. Assim, para não negligenciar as mesmas, introduz-se o coeficiente de descarga "C_d".

$$Cd = \frac{3 * Q}{2 * \sqrt{2g} * (L - 0{,}2H) * H^{\frac{3}{2}}} \tag{1}$$

$$Cd = \frac{15 * Q}{8 * \sqrt{2g} * tg\left(\frac{\theta}{2}\right) * H^{\frac{5}{2}}} \tag{2}$$

Sendo:

C_d – Coeficiente de descarga

Q – Vazão (m³/s)

g – Gravidade (m/s²)

L – Comprimento da soleira (m)

H – Altura da lâmina d'água (m)

θ – Ângulo de 90º

Para a leitura dos níveis de água a montante dos vertedores, utilizou-se a distância de 10 vezes a altura h, sendo h a altura da lâmina d´água na entrada dos vertedores. A medida foi obtida com uma régua graduada em centímetros. Para os dados iniciais, manteve-se a inclinação mínima de 0,05%, de modo a manter o escoamento uniforme, mantendo a linha piezométrica paralela ao fundo do canal. A vazão do equipamento mante-se constante, e foi determinada pelo método do flutuador (esferas de polietileno) calibrados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

No laboratório, foram feitas seis medidas com cada tipo de vertedor, calculando assim a vazão e em seguida o coeficiente de descarga. A vazão manteve-se a média de 1,778L/s. os resultados entre os valores não ocorreram diferenças, pois a vazão manteve-se constante durante todo o experimento. Foi observado uma diferença pouco significativa em relação a altura a montante dos vertedores, inferior a 0,01 cm em todo o experimento. O quadro 1 apresenta os valores dos cálculos para os modelos de vertedores, todos de paredes delgada.

Vertedor com duas contrações			
H (m)	L (m)	Q_1 (m³/s)	Cd (experimental)
0,053	0,09	0,001780655	0,6215
0,05	0,09	0,001643957	0,67318
0,054	0,09	0,001826675	0,60584
0,053	0,09	0,001780655	0,67318
0,052	0,09	0,001734857	0,6379
0,052	0,09	0,001734857	0,67318
Média			0,64746
Vertedor Triangular			
0,062	---------	0,001340	0,786329019
0,061	---------	0,001287	0,818952927
0,061	---------	0,001287	0,818952927
0,061	---------	0,001287	0,818952927
0,061	---------	0,001287	0,818952927
0,061	---------	0,001287	0,818952927
Média			0,813515609

Q1: vazão obtida pelos vertedores, considerando o Cd teórico das equações

Quadro 1: valores obtidos durante os experimentos

Em decorrência dos cálculos realizados, é evidente a presença de uma discrepância mínima entre o valor do coeficiente teórico e o valor do coeficiente de cálculo, resultando, na prática, em valores virtualmente idênticos tanto para os parâmetros teóricos quanto para aqueles derivados dos cálculos encontrados (Quadro 2).

Vertedor com duas contrações		
Cd Teórico	Cd experimental	%
0,62243	0,64746	2,25
Vertedor triangular		
Cd Teórico	Cd experimental	%
0,593	0,8135	22,05

Quadro 2 – Comparação dos coeficientes.

Percebe-se que para o vertedor triangular, o coeficiente obtido ficou com valor 22,05% maior que o valor teórico. Este valor superior foi ocasionado devido o vertedor não funcionar como um vertedor triangular, e sim como um vertedor composto, pois a altura da lâmina de água fica entre 1,4 e 1,8 cm acima do vertedor, o qual funciona como afogado.

Foram refeitos os cálculos considerando o vertedor composto, com triangular e retangular sem contrações. Para o cálculo do vertedor sem contração utilizou-se a equação (3) (Vianna; Rosa, 2012):

$$Q = 1{,}838.L.H^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

Deste modo a vazão ficou com uma média de 1,447 L/s ou 0,001447 m^3/s. Para avaliar as condições do vertedor triangular, optou para a pesquisa futura, a confecção de um vertedor em impressora 3D, para que não ocorresse o afogamento da estrutura, considerando uma melhor qualidade de resultados experimentais.

CONCLUSÃO

Os vertedores desempenham uma função de primordial importância na regulação e quantificação do fluxo hídrico em canais fluviais e reservatórios. A compreensão aprofundada do funcionamento destes dispositivos é de suma importância para a dimensionamento adequado de estruturas hidráulicas, a mitigação de eventos de inundação e a otimização da captação de água para uma ampla gama de usos.

No presente estudo, os resultados obtidos revelaram que os coeficientes identificados no estudo, em relação ao vertedor retangular com duas contrações, e parede delgada apresentaram valores dos coeficientes teóricos, com diferença de apenas 2%.

Porém em relação ao vertedor triangular não apresentou resultados próximos ao teórico, com um acréscimo de mais de 20%. Essa diferença pode ter sido ocasionada pelo “afogamento” do vertedor, o que representa que esse não foi dimensionado para a vazão do equipamento.

A segunda etapa da pesquisa, é a determinação dos coeficientes com inclinações variadas, uma vez que a linha piezométrica não irá coincidir com a linha de fundo do canal, podendo gerar valores diferentes, considerando o escoamento uniforme variado. Foram dimensionados para o canal de hidráulica mais três vertedores, com os modelos: circular, retangular sem contrações e um triangular, que foram construídos em impressoras 3D, o qual serão avaliados na continuação da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. U. de; ANGELO, R. M. B.; DANTAS, S. C.; Silva, D. F. da. **Determinação da Vazão em diferentes tipos de vertedores**. Ciências exatas e tecnológicas, Maceió. V. 3, n.3, p. 97-106. Novembro 2016.

AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de hidráulica**. 9 ed. São Paulo-SP. Editora Edgard Blücher. 2015.

BAPTISTA, Márcio; LARA, Márcia. Fundamentos de Engenharia Hidráulica. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG. 2018.

DANTAS, J. B.; SILVA, D. F. Vertedores e sua relevância nas usinas hidrelétricas. **Ciências exatas e tecnológicas**, Maceió, v. 3, n. 3, p. 241-250, Novembro, 2016. Disponível em <https://periodicos.set.edu.br/fitsexatas/article/view/3623/2054>. Acesso em: 16 de abril de 2023.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4 ed. São Carlos-SP. Editora Rima. 2006

ROSSI B. L., LIMA K. R., HERMANN K., CATHARINA K. R. S. **T**écnica de medição de vazão por vertedor triangular de parede delgada, instalado na UFMT. E&S - Engineering and Science 2015, 1:3

TOMAZ, Plínio. Vertedores de pequena barragem. **Curso de manejo de águas pluviais**, Cap.146, 2013.

VIANNA, M. R.; ROSA, D.W. B. **Utilização de vertedouros em estações de tratamento de água: Aplicações práticas e limitações.** XV SILUBESA, 2012. ABES. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267213428. Acesso em Março de 2023.

CAPÍTULO 16

EFICIÊNCIA E PERFORMANCE ENTRE RACK PARALELO DE BAIXA TEMPERATURA E UNIDADES *LOW CONDENSING*

Data de submissão: 15/03/2024 *Data de aceite: 01/04/2024*

Carlos Roberto Inácio
Faculdade FAPRO
Bauru - SP

Leandro Dornelas Moura
Faculdade FAPRO
Curitiba - PR

Alexandre Fernandes Santos
Faculdade FAPRO
Curitiba - PR
Lattes: http://lattes.cnpq.br/5698157457832235
Orcid:: http://orcid.org/0000-0001-5306-6968

Eliandro Barbosa de Aguiar
Faculdade FAPRO
Curitiba - PR
http://lattes.cnpq.br/5494485871678358
http://orcid.org/0000-0001-9994-7736

RESUMO*:* O presente projeto visou estudar diferentes sistemas de refrigeração no setor de congelados de um supermercado, o qual contêm 3 câmaras frigoríficas, tendo como objetivo comparar três sistemas de refrigeração, buscando verificar qual dos sistemas é mais eficiente no consumo de energia e conservação dos alimentos. O primeiro sistema estudado, funciona com o sistema *de low condensing*, com uma unidade condensadora para cada câmara frigorífica sendo condensado pelo glicol, totalizando 3 (três) equipamentos responsáveis pelo frio alimentar das mesmas, a segunda opção com o sistema paralelo convencional para baixa temperatura, e por último, o sistema paralelo com tecnologia dos compressores EVI (*Economized* vapor *Injection*). Os dados foram coletados diariamente por um período de 44 dias, em um supermercado localizado no município de Pirajuí - SP no ano de 2021. A *Racks Plotter* foi a empresa responsável pela instalação e montagens dos equipamentos de frio alimentar, além da geração dos relatórios dos sistemas testados, através de gráficos de temperatura do produto e consumo energético. No sistema *low condensing* a potência calculada (kw) foi 9,54% menor quando comparado ao sistema em paralelo convencional e 5,08% quando comparado ao sistema em paralelo EVI, demonstrando ser este sistema mais eficiente energeticamente utilizando um compressor de menor potência.

PALAVRAS-CHAVE*:* *Low condensing, Racks paralelos*, Refrigeração.

EFFIENCY AND PERFORMANCE BETWEEN LOW TEMPERATURE PARALLEL RACK AND *LOW CONDENSING* UNITS

ABSTRACT: The present project aimed to study different refrigeration systems in the frozen food sector of a supermarket. The main objective was to compare three refrigeration systems to determine which was more efficient in terms of energy consumption and aliments conservation. Three cold rooms using that work with the low condensing system were compared with The conventional parallel system and The parallel EVI (economized vapor injection) system, each one as a single unit with its own equipment, were compared amongst each other. All data were collected during a 44 days period in a supermarket located in the city of Pirajui, SP, in 2021. Racks Plotter was the company responsible for the instalation and assembly of all the cited equipments, as well as generation of reports for each tested system based on temperature graphics and energy consumption. The low condensing system presented a calculated potency (kW) 9,54% lower than the conventional paralel system, and 5,08% lower than the parallel EVI system. Therefore, the low condensing system proved to be more efficient in energy consumption using a less potent compressor than The othe two studied systems.

KEYWORDS: Low condensing; ParallelrRacks; Refrigerations

INTRODUÇÃO

No último ano o setor supermercadista brasileiro, de acordo com a associação Brasileira de Supermercados (ABRAS), teve um período de crescimento, demonstrando sua importância na economia nacional contribuindo com 7,5% do Produto Interno Bruto Nacional (PIB), conforme dados da 45ª edição do ranking Abras (2021), ainda de acordo com a ABRAS existem 91.351 lojas do setor supermercadista, empregando direta e indiretamente três milhões de pessoas.

No entanto, este mesmo setor sofre com a crise energética atual no país, sendo que o custo com energia nestes estabelecimentos considerado a segunda maior despesa dos supermercados, como cita a reportagem da revista Exame de Luciana Bruno (2015), a qual aborda a busca de projetos com maior eficiência energética para diminuir gastos com energia e com isso ter valores mais competitivos.

A competitividade do mercado influencia na adoção de equipamentos energeticamente mais desenvolvidos com um menor custo de energia e que possam atender ao propósito de conservação adequada dos alimentos. Este custo de energia influencia diretamente no preço final de venda das mercadorias.

Diante deste cenário, a busca por sistemas de refrigeração mais eficientes energeticamente torna-se uma solução para diminuição dos custos com energia e um fator importante para competição de preços aplicados nestas mercadorias.

A combinação de fluidos para aumentar a eficiência do sistema, reduzir o diâmetro das tubulações e diminuir a quantidade de fluidos não ecológicos, também pode ser ferramenta para aumentar a eficiência do sistema de refrigeração (ANA PAULA BASILE PINHEIRO, 2019)

Sistemas de refrigeração como *low condensing* é hoje uma ferramenta que pode ser adotada para diminuir o consumo de energia destes estabelecimentos, além de diminuir a quantidade de fluidos não ecológicos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados foram coletados em um supermercado, localizado no município de Pirajuí – SP *(*Figura 1) seguindo a norma 16255 para projetos e instalação de sistema frigoríficos em supermercados (ABNT, 2013). Os dados foram obtidos pelo sistema de automação de fabricação **EMERSON DIXELL** por um período de 44 dias (17/10/21 a 30/11/21). A *Racks Plotter* foi a empresa responsável pela instalação e montagens dos equipamentos de frio alimentar e geração dos relatórios dos sistemas testados.

Foram analisados três tipos de sistema para refrigeração das câmaras frigorificas de congelados, o primeiro que funciona com o sistema de *low condensing*, ou seja, uma unidade para cada câmara frigorífica, totalizando 3 (três) equipamentos responsáveis pelo frio alimentar das mesmas, o segundo com sistema paralelo para baixa temperatura convencional, e terceiro com sistema paralelo para baixa temperatura que trabalham com compressores EVI (*Economized Vapor Injection).*

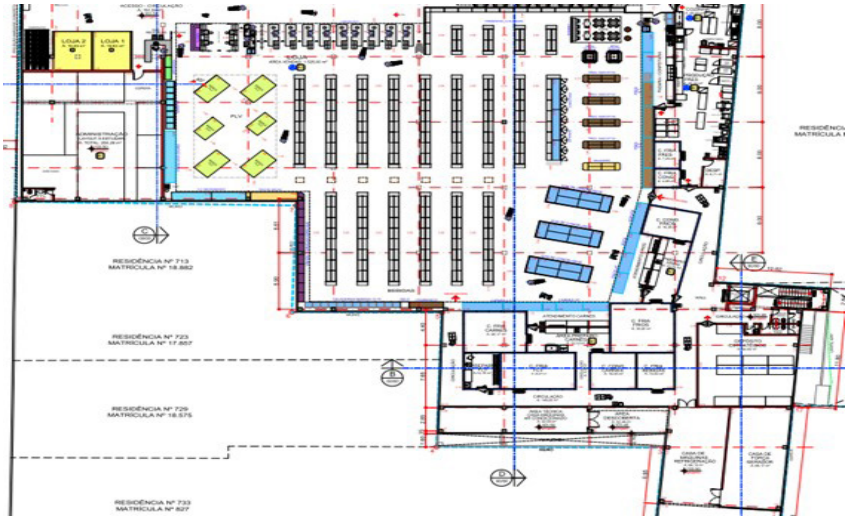


Figura 1 Layout da planta do local onde foram realizados os testes

Automação do sistema

Os Modelos dos controladores responsáveis pelo gerenciamento e monitoramento dos sistemas foram: Sistema *rack* paralelo média temperatura; controlador iprogenius – ipg215rackbr + ipx215d; Sistema *low condensing* para baixa temperatura - controlador xc450cx_3.4 e Sistema de bombeamento do fluido secundário - controlador ipg208bombas.

O quadro de distribuição de linhas para ambientes resfriados glicol com controle de temperatura foi **XR35CX**, e para ambientes congelados com degelo elétrico **XM669K_v5.4.**

Para a medição de energia setorizada foi utilizado medidor **Emerson Energy Meter (EEM)**, com TC's de tensão **0,33V**, divididos conforme os setores: QGBT (Quadro Geral de Baixa Tensão); Ar-condicionado; Padaria; Rack Resfriados; Chiller Bombas; Unidades *low condensing*; Quadro de linhas e Ilhas Plug in (Congelados).

A supervisão e monitoramento remoto, via internet e envio de alarmes por e-mail, foi através do *software* Dixell **XWEB500 EVO** fabricado pela Emerson Electric Co.

Sistema de Média Temperatura (Resfriados)

O sistema de média temperatura ***é*** do tipo indireto, utilizando o fluido refrigerante R134a como agente primário e solução aquosa de propileno glicol como fluido secundário na proporção de 25% para as Câmaras Frigoríficas, Salas de Preparo, Expositores Refrigerados e Climatização da Casa de Máquinas.

Em função das cargas térmicas de resfriados a instalação de refrigeração foi composta por quatro compressores, semi-herméticos trabalhando no regime de -8ºC/+45ºC, montados em paralelo, um deles tem capacidade variável controlada por inversor de frequência, os demais são com partida do tipo *soft starter*, *chiller* de bombas e com condensação a ar. Todos compressores, componentes e equipamentos estão montados em base de estrutura metálica denominada "*rack*", formando uma unidade compacta.

O *Chiller* de Bombas para glicol contém válvulas de expansão eletrônica, dois trocadores de calor a placas independentes para resfriamento do retorno do glicol até a temperatura de saída de -2°C, e um terceiro trocador para resfriamento do glicol de -2°C até -4°C que estão conectados aos expositores de carnes de atendimento, autosserviço e de bebidas. O *chiller* é composto por duas bombas, uma reserva e ambas comandadas por inversor de frequência com rodízio automático a cada 48 horas.

Sistema *low condensing* de Baixa Temperatura (Congelados)

O sistema de frio alimentar que atende ao regime de baixa temperatura (congelados) ***é*** composto por três unidades de equipamentos independentes, com fluido refrigerante R404A, compressores herméticos scroll e inversor de frequência (trabalhando no regime de –30ºC/+5ºC) para atender o sistema de congelados, utilizando o circuito de glicol como agente de condensação (conceito *low condensing*), posicionadas sobre as respectivas câmaras frigoríficas que requerem sua demanda. Os forçadores das câmaras frigorificas de congelados são compostos por elementos de expansão eletrônico tipo pulso. As ilhas de congelados (fabricante AHT) são do tipo *plug-in*, portanto autônomas em relação ao sistema de refrigeração.

Sistema Paralelo Convencional de Baixa Temperatura (Congelados)

O sistema de frio alimentar do regime de baixa temperatura (congelados), no qual realizou-se o comparativo, adota o conceito de refrigeração do tipo expansão direta, com utilização do fluido R404A. O rack é composto com três compressores *scroll*, trabalhando no regime de –30ºC/+45ºC.

Um dos compressores tem capacidade variável controlada por inversor de frequência. Os demais compressores são com partida do tipo *soft starter*. Na mesma estrutura estão os coletores dos circuitos frigoríficos compostos por três circuitos de linhas de líquido e sucção responsáveis pela interligação da casa de máquinas as câmaras frigoríficas de congelados.

Sistema Paralelo com Tecnologia EVI de Baixa Temperatura (Congelados)

Esse sistema é composto por três compressores com tecnologia *scroll* EVI com controle digital, trabalhando no regime de –30ºC/+45ºC, controlados com partida do tipo *soft starter*. Na mesma estrutura estão os coletores dos circuitos frigoríficos compostos por três circuitos de linhas de líquido e sucção responsáveis pela interligação da casa de máquinas ***à***s câmaras frigoríficas de congelados.

Todos os sistemas são compostos por controles elétricos e eletrônicos de gerenciamento e para a condensação do fluido refrigerante são utilizados condensadores remotos em "V", no qual o conjunto dos motos ventiladores é controlado por inversor de frequência, utilizando como forma de controle a condensação flutuante.

Características Técnicas da Instalação

As características técnicas da instalação e dados estimados dos sistemas estão nas Tabelas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11 e 12. Os dados estimados de eficiência do sistema propileno glicol e *low condensing* para suprir a demanda energética encontram-se na Tabela 7. A potência estimada para suprir os sistemas de propileno glicol e paralelo de congelados convencional encontram-se na tabela 10 e a potência estimada para suprir os sistemas propileno glicol e paralelo congelados EVI encontra-se na tabela 13.

Condições de Projeto			**Temperatura na loja: 24°C Umidade relativa na loja: 60%UR**		
Ramal	**Linha Elétrica**	**Gabinete**	**Modulação**	**Carga Térmica**	**Vazão**
1 A	1A01	2P - Confeitaria	2,5m	1.875 kcal/h	0,99 m³/h
1 A	1A02	VALP - Laticínios	2,5m + 3,75m + 3,75m	3.930 kcal/h	2,07 m³/h
1 A	1A03	VALP - Laticínios	2,5m + 3,75m + 3,75m	3.930 kcal/h	2,07 m³/h
1 A	1A04	VALP - Frios	3,75m	1.474 kcal/h	0,77 m³/h
1 A	1A05	2P - Pizzas	2,5m + 2,5m	3.750 kcal/h	1,97 m³/h
1 A	1A06	VC2P - Frios	2,5m	1.050 kcal/h	0,55 m³/h
1 A	1A07	VAH - FLV	3,75m + 3,75m	7.733 kcal/h	2,71 m³/h

			Sistemas	Total	Total
			Média A (T. Evap.: - 8°C)	**23.742 kcal/h**	**11,13m³/h**
1 B	1B01	VCA2P - Açougue	1,25m + 2,5m + 2,5m	2.813 kcal/h	1,48 m³/h
1 B	1B02	VACP - Açougue	3,75m + 3,75m	3.675 kcal/h	1,93 m³/h
1 B	1B03	VACP - Bebidas	3,75m	1.838 kcal/h	0,97 m³/h
1 B	1B04	VACP - Bebidas	2,5m	1.225 kcal/h	0,64 m³/h
1 B	1B05	VACP - Bebidas	2,5m	1.225 kcal/h	0,64 m³/h
			Sistemas	**Total**	**Total**
			Média B (T. Evap.: -8°C)	**10.776kcal/h**	**5,66m³/h**

Tabela 1. Características Técnicas da Instalação Expositores Sistema de média temperatura (Fabricante NSF)

Condições de Projeto			**Temperatura na loja: 24°C Umidade relativa na loja: 60%UR**		
Ramal	**Linha Elétrica**	**Câmara**	**Área**	**Carga Térmica**	**Vazão**
1 A	1A08	C. Carnes, TI=+0°C, PDL=3,0m	28,18m2	7.050 kcal/h	6,44 m³/h
1 A	1A09	P. FLV, TI=+15°C, PDL=3,0m	14,19m2	2.580 kcal/h	0,42 m³/h
1 A	1A10	C. FLV, TI=+8°C, PDL=3,0m	29,67m2	5.760 kcal/h	1,01 m³/h
1 A	1A11	P. Carnes, TI=+12°C, PDL=3,0m	28,50m2	4.935 kcal/h	0,80 m³/h
1 A	1A12	C. Bebidas, TI=+1°C, PDL=3,0m	14,84m2	4.300 kcal/h	3,77 m³/h
1 A	1A13	C. Frios, TI=+2°C, PDL=3,0m	33,64m2	7.110 kcal/h	2,49 m³/h
1 A	1A14	P. Frios, TI=+15°C, PDL=3,0m	21,98m2	3.420 kcal/h	0,55 m³/h
1 A	1A15	C. Padaria, TI=+2°C, PDL=3,0m	7,59m2	2.430 kcal/h	0,85 m³/h
1 A	1A16	Casa de máquinas, TI=+25°C, PDL=4,0m	36,00m2	10.200 kcal/h	1,34 m³/h
		Sistemas		**Total**	**Total**
		Média A (T. Evap.: -8°C)		**47.785Kcal/h**	**17,67m³/h**

Tabela 2. Características Técnicas da Instalação: Salas de Preparo, Câmaras Frias Resfriados e Casa de Máquinas - Sistema de média temperatura

Condições de Projeto			**Temperatura na loja: 24°C Umidade relativa na loja: 60%UR**		
Ramal	**Linha Elétrica**	***Low Condensing***		**Carga Térmica**	**Vazão**
1 A	1A17	Condensação Eco Pack F		7.385 kcal/h	1,94 m³/h
1 A	1A18	Condensação Eco Pack G		6.965 kcal/h	1,83 m³/h
1 A	1A19	Condensação Eco Pack H		6.647 kcal/h	1,75 m³/h
		Sistemas		Total	Total
		Média A (T. Evap.: -8°C)		20.997kcal/h	5,52m³/h

Tabela 3. Características Técnicas da Instalação *low condensing*

Condições de Projeto			Temperatura na loja: 24°C Umidade relativa na loja: 60%UR	
Ramal	**Linha Elétrica**	**Câmara**	**Área**	**Carga Térmica**
1F	1F01	C. Cong. Carnes, TI=-18°C, PDL=3,0m	18,06 m2	4.550 kcal/h
		Sistema	**Baixa F (T. Evap.: -30°C)**	**4.550kcal/h**
1G	1G01	C. Cong. Frios, TI=-18°C, PDL=3,0m	16,45m2	4.250 kcal/h
		Sistema	**Baixa G (T. Evap.: -30°C)**	**4.250kcal/h**
1H	1H01	C. Cong. Padaria, TI=-18°C, PDL=3,0m	7,36m2	4.056 kcal/h
		Sistema	**Baixa H (T. Evap.: -30°C)**	**4.056kcal/h**

Tabela 4. Características Técnicas da Instalação Câmaras Frias Congelados

Compressores		Semi-hermético	Scroll	Scroll	Scroll
Tensão (V)		380V	380V	380V	380V
Fluido Refrigerante		R134a	R404A	R404A	R404A
Carga Fluido Refrig.		95,30 Kg	2,50 Kg	2,50 Kg	2,50 Kg
Sistema		Paralelo	Low condensing	Low condensing	Low condensing
Regime		Resfriados	Congelados	Congelados	Congelados
Carga Térm. Req. (Kcal/h)		103.300	4.550	4.250	4.056
Condição		-8ºC/+45ºC	-30ºC/+5ºC	-30ºC/+5ºC	-30ºC/+5ºC
Quantidade		4	1	1	1
Compressor		4DJNR19ME-AWX	ZS21KAE	ZS21KAE	ZS21KAE
Carga Térmica (Kcal/h)	**Unitária**	30.500	4.930	4.930	4.930
	Total	122.000	4.930	4.930	4.930
Folga		15,33%	7,71%	13,79%	17,73%
COP Compressor		2,70	2,10	2,10	2,10
Potência (kW)	**Unitária**	13,55	2,40	2,40	2,40
	Total	54,20	2,40	2,40	2,40
Corrente (A)	**Unitária**	28,40	2,80	2,80	2,80
	Total	113,60	2,80	2,80	2,80
Pressão (Psia)	**Baixa**	31,47	29,34	29,34	29,34
	Alta	168,20	111,79	111,79	111,79
RC		5,35	3,81	3,81	3,81
COP Sistema		1,96			

Tabela 5. Características técnicas e dados (estimados) das cargas térmicas dos sistemas propileno glicol e *low condensing* de acordo com o compressor utilizado

Bomba		
Descritivo		Chiller
Regime		Resfriados
Quantidade Glicol		400 litros
Quantidade Água		1200 litros
Quantidade		1
Tensão (V)		380V
Potência (kW)	**Unitária**	7,40
	Total	7,40
Corrente (A)	**Unitária**	11,90
	Total	11,90
Condensador Remoto		
Tipo		V
Quantidade		1
Fluido Refrigerante		R134a
Tensão (V)		380V
Condição		-8ºC/+45ºC
Modelo Condensador		ACV 288
Carga Térmica (Kcal/h)	**Unitária**	255.705
	Total	288.000
Folga		11,21%
ΔT ºC		7
Potência (kW)		8,60
Nível Ruido (dBA)		50
Corrente (A)		17,10
Número de Motores		4
Polos Motores		6
Al./Pol.		12

Tabela 6. Características técnicas e dados (estimados) das cargas térmicas entre os sistemas propileno glicol e *low condensing* com a bomba e condensador remoto utilizados

P. A. T. S. M/B (1) (kW)	**77,40**
C. T. S. M/B (2) (A)	**151,00**
P. T. S. M/B (3) (kVA)	**99,39**
P. T. S. M/B (4) (kW)	**91,43**

(1) Potência Absorvida Total Sistema de Média e Baixa (kW); (2) Corrente Total Sistema de Média e Baixa (A); (3) Potência Total Sistema de Média e Baixa (kVA); (4) Potência Total Sistema de Média e Baixa (kW).

Tabela 7. Dados estimados de eficiência do sistema propileno glicol e *low condensing* para suprir a demanda energética, calculados através de software da empresa fornecedora dos equipamentos

Sistema		Propileno glicol	Paralelo congelados
Tipo		Semi-hermético	Scroll
Tensão (V)		380V	380V
Fluido Refrigerante		R134a	R404A
Carga Fluido Refrig.		95,30 Kg	27,00 Kg
Sistema		Paralelo	Paralelo
Regime		Resfriados	Congelados
Carga Térmica Requerida (Kcal/h)		82.303,00	12.856,00
Condição		-8ºC/+45ºC	-30ºC/+45ºC
Quantidade		4	3
Compressor		4DHNR16ME-AWX	ZF25K4E-TF7
Carga Térmica (Kcal/h)	**Unitária**	25.100	5.230
	Total	100.400	15.690
Folga		18,02%	18,06%
COP Compressor		2,70	1,30
Potência (kW)	**Unitária**	11,30	5,24
	Total	45,20	15,72
Corrente (A)	**Unitária**	27,40	9,80
	Total	109,6	29,40
Pressão (Psia)	**Baixa**	31,47	29,34
	Alta	168,20	296,60
RC		5,35	10,11
COP Sistema		1,82	

Tabela 8. Características técnicas e dados (estimados) das cargas térmicas dos sistemas propileno glicol e paralelo congelados convencional de acordo com o compressor utilizado

Bomba			
Descritivo		Chiller	
Regime		Resfriados	
Quantidade Glicol		400 litros	
Quantidade Água		1200 litros	
Quantidade		1	
Tensão (V)		380V	
Potência (kW)	**Unitária**	7,40	
Potência (kW)	**Total**	7,40	
Corrente (A)	**Unitária**	11,90	
Corrente (A)	**Total**	11,90	
Condensador remoto			
Sistema		Propileno glicol	Paralelo congelados
Tipo		V	PLANO
Quantidade		1	1
Fluido Refrigerante		R134a	R404A

Tensão (V)		380V	380V
Condição		-8ºC/+45ºC	-30ºC/+45º
Modelo Condensador		ACV 223	ACC047
Carga Térmica (Kcal/h)	**Unitária**	210.433	37805
	Total	223.350	47200
Folga		5,78%	19,90%
Potência (kW)		6,5	0,80
Nível Ruido (dBA)		49	36
Corrente (A)		12,80	2,30
Número de Motores		3	2
Polos Motores		6	12
Al./Pol.		10	10

Tabela 9. Características técnicas e dados (estimados) das cargas térmicas entre os sistemas propileno glicol e paralelo congelados convencional com a bomba e condensador remoto utilizados

P. A. T. S. M/B (1) (kW)	**75,62**
C. T. S. M/B (2) (A)	**166,00**
P. T. S. M/B (3) (kVA)	**109,26**
P. T. S. M/B (4) (kW)	**100,52**

(1) Potência Absorvida Total Sistema de Média e Baixa (kW); (2) Corrente Total Sistema de Média e Baixa (A); (3) Potência Total Sistema de Média e Baixa (kVA); (4) Potência Total Sistema de Média e Baixa (kW).

Tabela 10. Potência estimada para suprir os sistemas instalados de propileno glicol e paralelo de congelados convencional.

Compressores		Semi-hermético	Scroll EVI
Tensão (V)		380V	380V
Fluido Refrigerante		R134a	R404A
Carga Fluido Refrig.		95,30 Kg	27,00 Kg
Sistema		Paralelo	Paralelo
Regime		Resfriados	Congelados
Carga Térmica Requerida (Kcal/h)		82.303	12.856
Condição		-8ºC/+45ºC	-30ºC/+45ºC
Quantidade		4	3
Compressor		4DHNR16ME-AWX	ZF13KVE-TF7
Carga Térmica (Kcal/h)	**Unitária**	25.100	5.300
	Total	100.400	15.900
Folga		18,02%	19,14%
COP Compressor		2,70	1,60
Potência (kW)	**Unitária**	11,30	3,81
	Total	45,20	11,43
Corrente (A)	**Unitária**	27,40	7,20
	Total	109,60	21,60

Pressão (Psia)	**Baixa**	31,47	29,34
	Alta	168,20	296,60
RC		5,35	10,11
COP Sistema		1,95	

Tabela 11. Características técnicas e dados (estimados) das cargas térmicas dos sistemas propileno glicol e congelados (EVI) de acordo com o compressor utilizado

Bomba			
Descritivo		Chiller	
Regime		Resfriados	
Quantidade Glicol		400 litros	
Quantidade Água		1200 litros	
Quantidade		1	
Tensão (V)		380V	
Potência (kW)	**Unitária**	7,40	
	Total	7,40	
Corrente (A)	**Unitária**	11,90	
	Total	11,90	
Condensador remoto			
Tipo		V	Plano
Quantidade		1	1
Fluido Refrigerante		R134a	R404A
Tensão (V)		380	380
Modelo Condensador		ACV 223	ACC 059
Carga Térmica (Kcal/h)	**Unitária**	210.433	55.216
	Total	223.350	59.200
Folga		5,78%	6,73%
ΔT ^{0}C		7	7
Potência (kW)		6,50	0,80
Nível Ruido (dBA)		49	36
Corrente (A)		12,80	2,30
Número de Motores		3	2
Polos Motores		6	12
Al./Pol.		10	12

Tabela 12. Características técnicas e dados (estimados) das cargas térmicas entre os sistemas propileno glicol e Paralelo congelados (EVI) de acordo com a bomba e condensador remoto utilizados

P. A. T. S. M/B [1] (kW)	71,33
C. T. S. M/B [2] (A)	158,20
P. T. S. M/B [3] (kVA)	104,12
P. T. S. M/B [4] (kW)	95,79

[1] Potência Absorvida Total Sistema de Média e Baixa (kW); [2] Corrente Total Sistema de Média e Baixa (A); [3] Potência Total Sistema de Média e Baixa (kVA); [4] Potência Total Sistema de Média e Baixa (kW).

Tabela 13. Potência estimada para suprir os sistemas instalados propileno glicol e paralelo de congelados EVI

ANÁLISE DOS DADOS

Os dados foram analisados através dos relatórios gerados pelo *software Product Selection* da Emerson (Versão 1.1.5.4), para os três sistemas instalados. Os resultados apresentados, gerados à campo foram obtidos pelo gerenciador XWEB 500 D EVO *Software* 5.6.0-B16.

Foram calculadas: Potência Absorvida Total Sistema de Média e Baixa (kW); Corrente Total Sistema de Média e Baixa (A); Potência Total Sistema de Média e Baixa (kVA); Potência Total Sistema de Média e Baixa (kW); Corrente Média Nominal Teórica e Corrente Média Registrada; Potência Nominal Teórica e Potência Média Registrada.

Os dados para obtenção da média das correntes e potências estimadas e analisadas foram obtidos através do *Software* SAS (*Statistical Analysis System*) pelo procedimento PROC GLM.

RESULTADOS OBTIDOS

Verificou-se que de 17/10/2021 até 24/10/2021 a temperatura ambiente interna da câmara de congelados de carnes, frios e padaria atinge o *set point* da temperatura ambiente (temperatura programada a ser atingida de – 18ºC) definido em projeto, após esse dia a temperatura ambiente começa a subir devido ao desligamento das câmaras para finalização da montagem das mesmas, voltando, a partir do dia 25/10/2021 a ser ligada novamente, a qual funciona até 30/10/2021, atingindo o set point de projeto no mesmo dia. Desligou-se a câmara neste dia, voltando a religá-la dia 06/11/2021, inicialmente a temperatura ambiente interna ficou instável, devido à abertura das portas para posicionamento das prateleiras de armazenamento dos produtos, voltando a atingir a temperatura desejada no mesmo dia. A partir da estabilização da temperatura o sistema busca manter o superaquecimento da válvula de expansão eletrônica dentro da programação estabelecida (temperatura programada superaquecimento 8ºC) (Gráfico 1, 2, 3).

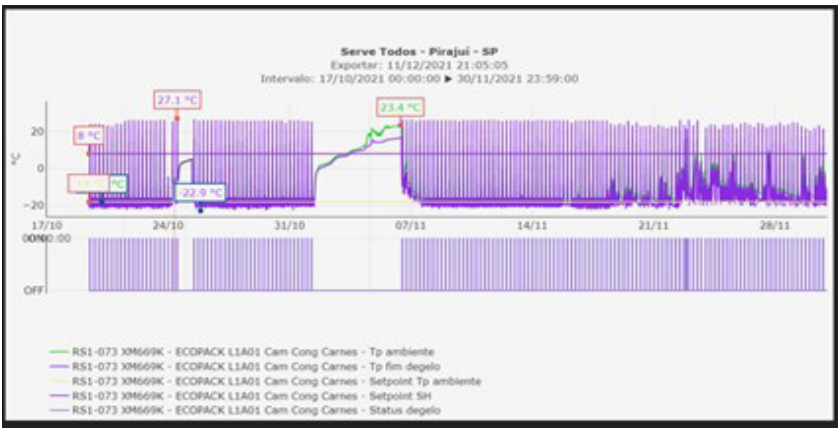


Gráfico 1. Temperatura câmara congelados carnes (L1A01)

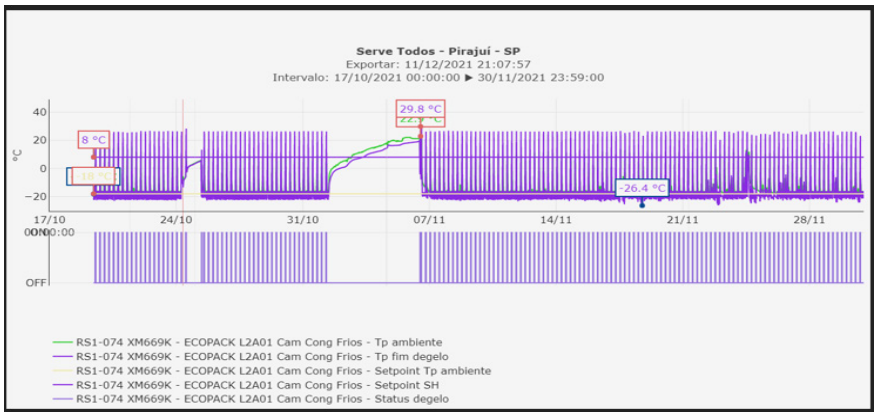


Gráfico 2. Temperatura câmara congelados frios (L2A01)

Gráfico 3. Temperatura câmara congelados padaria (L3A01)

O sistema de degelo das câmaras de congelados é com programação horária. Observou-se que no período de 24 horas o degelo das câmaras do setor de carnes, frios e padaria ocorreram a cada 6 horas dentro do horário programado, totalizando 4 degelos ao dia (Gráfico 4).

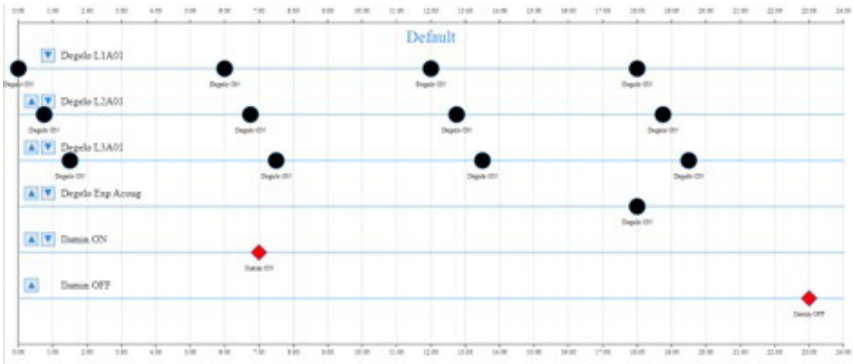


Gráfico 4. Programação de degelo dos ambientes das câmaras de congelados

O Gráfico 5 representa a faixa de oscilação da tensão elétrica durante o período analisado. Foi possível observar que a variação da tensão durante esse período oscilou em 1,50%.

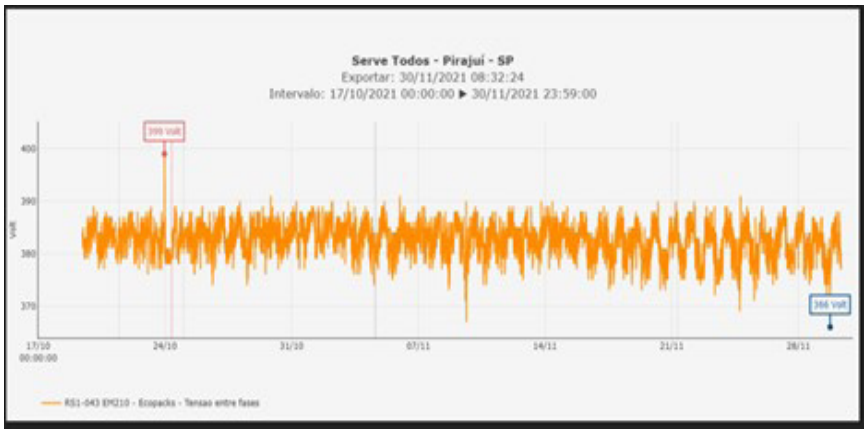


Gráfico 5. Registro do comportamento da Tensão no período analisado

A energia consumida pelas câmaras de congelados e *low condensing*, durante 44 dias, após serem ligadas foi de 428 kW/h no início aumentando até o dia 30 para 4556 kW/h, totalizando nesse período o consumo total de 4128 kW/h (Gráfico 6).

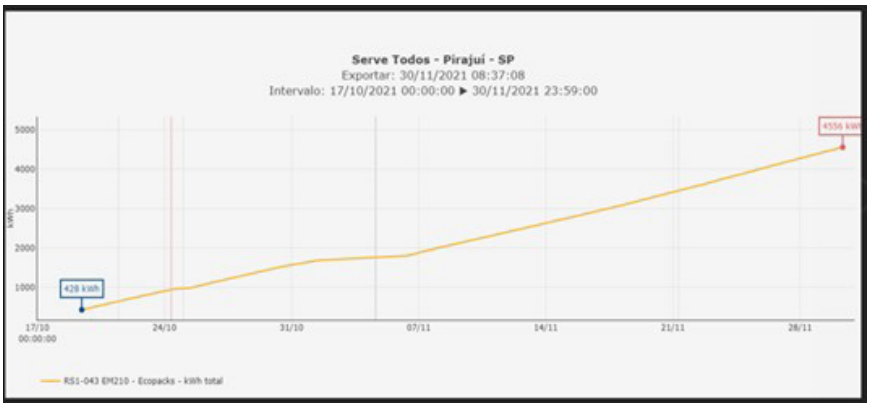


Gráfico 6. Registro do consumo energético total das *low condensing*

A variação da corrente nas fases R, S, T, durante o período registrado, pode ser observada no Gráfico 7.

Gráfico 7. Comportamento da Corrente Fases (R S T) das *low condensing* no período analisado

A corrente média obtida no período analisado foi de 7,56 A, 10% menor que a corrente estimada (8,40 A) para o sistema *low condensing* (Tabela 14).

Tratamento	Média (A)	Erro Padrão	Probabilidade
Corrente Estimada	8,40	0,022	<0,001
Corrente Analisada	7,56	0,022	<0,001

Tabela 14. Média das correntes estimadas e analisadas do sistema low condensing

A potência média, no período analisado, do sistema *low condensing* foi de 4,10 kW com variação percentual a menos de 19,41% que a potência estimada (5,09 kW) (Tabela 15).

Tratamento	Média (kW)	Erro Padrão	Probabilidade
Potência Estimada	5,09	0,023	<0,001
Potência Analisada	4,10	0,023	<0,001

Tabela 15. Média das potencias estimadas e analisadas do sistema low condensing

O sistema Propileno Glicol e *low condensing* apresentou Potência Instalada (kW) 9,04% menor quando comparado ao sistema propileno glicol e paralelo congelados convencional e 4,55% menor quando comparado ao sistema propileno glicol e paralelo congelados (EVI) (Tabela 16; Gráfico 8; Gráfico 9), indicando maior eficiência energética do sistema *low condensing* quando comparado aos outros sistemas. As unidades *low condensing* consomem menos energia ao diminuir a temperatura entre a condensação e a evaporação, há redução do ΔT de trabalho do compressor, aumentando a eficiência térmica do sistema e gerando menor consumo energético. Em supermercados que possuem o sistema *low condensing* e propileno glycol, há o aproveitamento do retorno do glycol utilizado no circuito de refrigerados para condensação do circuito de congelados, reduzindo o consumo energético do sistema de baixa pela utilização de compressor de menor potência (TERMOPROL, 2021).

PLOPILENO GLICOL E LOW CONDENSINGINS		PLOPILENO GLICOL E PARALELO CONGELADOS		PLOPILENO GLICOL E PARALELO CONGELADOS (EVI)	
P. A. T. S. M/B (1) (kW)	77,40	P. A. T. S. M/B (1) (kW)	75,62	P. A. T. S. M/B (1) (kW)	71,33
C. T. S. M/B (2) (A)	151,00	C. T. S. M/B (2) (A)	166,00	C. T. S. M/B (2) (A)	158,20
P. T. S. M/B (3) (kVA)	99,39	P. T. S. M/B (3) (kVA)	109,26	P. T. S. M/B (3) (kVA)	104,12
P. T. S. M/B (4) (kW)	91,43	P. T. S. M/B (4) (kW)	100,52	P. T. S. M/B (4) (kW)	95,79

(1) Potência Absorvida Total Sistema de Média e Baixa (kW); (2) Corrente Total Sistema de Média e Baixa (A); (3) Potência Total Sistema de Média e Baixa (kVA); (4) Potência Total Sistema de Média e Baixa (kW).

Tabela 16. Comparativo entre os dados elétricos dos sistemas instalados

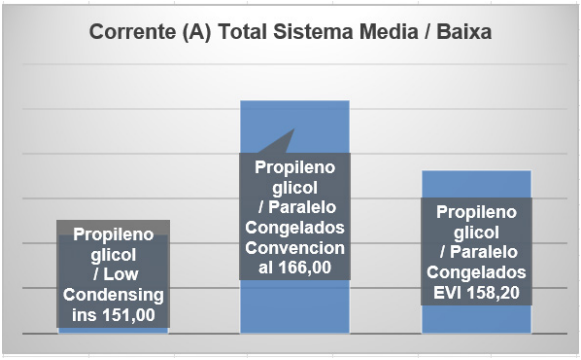


Gráfico 8. Comparativo das correntes entre os sistemas

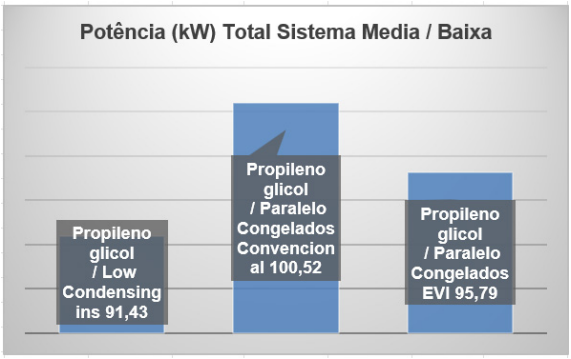


Gráfico 9. Potência Total Instalada entre os sistemas analisados

DADOS SOFTWARE LOW CONDENSINGINS		DADOS REGISTRADOS LOW CONDENSINGINS	
P. A. T. S. M/B (1) (kW)	7,20	P. A. T. S. M/B (1) (kW)	-------
C. T. S. M/B (2) (A)	8,40	C. T. S. M/B (2) (A)	7,56
P. T. S. M/B (3) (kVA)	5,53	P. T. S. M/B (3) (kVA)	4,98
P. T. S. M/B (4) (kW)	5,09	P. T. S. M/B (4) (kW)	4,10

(1) Potência Absorvida Total Sistema de Média e Baixa (kW); (2) Corrente Total Sistema de Média e Baixa (A); (3) Potência Total Sistema de Média e Baixa (kVA); (4) Potência Total Sistema de Média e Baixa (kW).

Tabela 17. Dados comparativos gerados pelo software do fabricante e dados registrados a campo do sistema low condensing

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O consumo de energia em supermercados corresponde a um dos maiores custos do setor, estando relacionados principalmente aos gastos com os sistemas de refrigeração adotados. Com base nos resultados obtidos verificou-se, após a realização da correção nos dados comparativos entre os sistemas, que a diferença entre o sistema Composto pelo Propileno Glicol e *low condensing* apresenta Potência Instalada (kW) 9,54% menor quando comparado ao sistema Propileno Glicol e Paralelo Congelados Convencional e 5,08% menor quando comparado ao sistema Propileno Glicol e Paralelo Congelados (EVI). Demostrando que o sistema *low condensing* apresentou maior eficiência energética e consequentemente gerando menor custo de energia. Estes resultados sugerem a realização de mais estudos sobre os custos de investimentos de implementação, manutenção, a confiabilidade e a eficiência de sistema *low condensing* para refrigeração de supermercados, com a finalidade de diminuir o consumo energético em sistemas de refrigeração para baixa temperatura.

REFERÊNCIAS

ABRAS (São Paulo) (org.). SUPERHIPER: ranking abras 2022. Ranking Abras 2022. Disponível em: https://superhiper.abras.com.br/pdf/280.pdf. Acesso em: 16 out. 2023.

LUCIANA BRUNO (São Paulo) (ed.). ENERGIA passa a ser 2ª maior despesa de supermercados. 2015. Disponível em: https://exame.com/economia/energia-passa-a-ser-2a-maior-despesa-de-supermercados/. Acesso em: 16 out. 2023.

ANA PAULA BASILE PINHEIRO. USO combinado de diferentes fluidos refrigerantes explora as características mais favoráveis de cada um deles. 2019. Disponível em: https://www.engenhariaearquitetura.com.br/2019/03/uso-combinado-de-diferentes-fluidos-refrigerantes-explora-as-caracteristicas-mais-favoraveis-de-cada-um-deles. Acesso em: 16 out. 2023.

ABNT. NBR 16255 - Sistemas de refrigeração para supermercados — Diretrizes para o projeto, instalação e operação. Brasil: [s.n.], 2013.

TERMOPROL. Eficiência energética em sistemas de refrigeração de supermercados. Disponível em: https://www.termoprol.com.br/noticias/eficiencia-energetica-em-sistemas-de-refrigeracao-de-supermercados. Acesso em: 16 out. 2023.

LOW CONDENSING REFRIGERATOR. EMERSON. 2021. Disponível em: https://www.emerson.com/documents/commercial-residential/low-condensing-refrigeration-what-it-en-us-178086.pdf>. Acesso em: 16 out. 2023.

GENIER, F.S. Ciclos de refrigeração: conceitos e estudos de eficiência. Enciclopédia Biosfera. Goiânia, v.9, N.16; p. 201, 07 de 2013.

BRUNO, Luciano. Energia passa a ser a 2ª maior despesa de supermercados. Revista Exame, Disponível em: https://exame.com/economia/energia-passa-a-ser-2a-maior-despesa-de-supermercados/>. Acesso em: 16 out. 2023.

CINTRA, P. Métodos de conservação de alimentos. Nutrisaude. 2014. Disponível em: https://nutrisaude14.files.wordpress.com/2014/11/mc3atodos-de-conservac3a7c3a3o-dos-alimentos-2014.pdf>. Acesso em: 16 out. 2023.

FERRAZ, F.; GOMES, M. O histórico da refrigeração, fluidos refrigerantes, ozônio, processo de formação, destruição de sistemas de refrigeração, componentes de um sistema de refrigeração. WORDPRESS. 2008. Disponível em: < https://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/08/ref1.pdf>. Acesso em: 16 out. 2023.

MODELAGEM DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR TRANSIENTE EM UM MFPL QUE OPERA NO MODO BLOWDOWN

Data de aceite: 01/04/2024

Arthur Durigan Bahdur
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil
Aluno de Mestrado do curso de Ciência e Tecnologias Espaciais – PG/CTE

Tiago Barbosa de Araújo
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO: A modelagem da troca de calor, em motores foguete a propelente líquido (MFPL), entre os gases resultantes da combustão e as paredes da câmara, é essencial para determinar o tipo de material utilizado na câmara bem como suas espessuras, principalmente quando não há sistema de refrigeração. Para MFPL's que operam no modo blowdown, esta troca de calor é transiente durante todo o funcionamento do motor, uma vez que não há um modo estacionário de operação. O sistema utilizado se baseia em um problema de valor inicial do modus operandi do motor, onde a maior diferença de pressão entre a câmara e os tanques de propelente é no momento de abertura das válvulas, uma vez que a pressão na câmara é a ambiente. Para o cálculo da troca de calor transiente, primeiro foram geradas as curvas de funcionamento do motor (pressão, empuxo, razão de mistura etc.) ao longo do tempo. Com estas, foram calculadas as trocas de calor convectivo e radiativo entre os gases e a câmara e a troca de calor radiativo da câmara com o ambiente externo. Os resultados mostraram que a maior troca de calor é na região próxima à garganta da tubeira. Além disso, para o motor analisado, foi necessário utilizar uma espessura maior na região da tubeira para não ocasionar falha estrutural do material.

PALAVRAS-CHAVE: Motor Foguete, Propelente Líquido, Propulsão, *Blowdown*, Troca de Calor.

MODELING TRANSIENT HEAT TRANSFER IN AN MFPL OPERATING IN BLOWDOWN MODE

ABSTRACT: The heat exchange modeling in liquid rocket engines (LRE) between the combustion gases and the chamber walls is essential for determining the type of material used in the chamber as well as its thickness, especially when there is no cooling system. For LREs operating in blowdown mode, this heat exchange is transient throughout the engine's operation since there is no steady-state mode of operation. The system used is based on an initial value problem of the

engine's modus operandi, where the greatest pressure difference between the chamber and propellant tanks occurs at the valve opening moment, as the chamber pressure is at ambient level. To calculate transient heat exchange, the engine's operational curves (pressure, thrust, mixture ratio, etc.) over time were first generated. With these, convective and radiative heat exchanges between gases and the chamber, as well as the radiative heat exchange from the chamber to the external environment, were calculated. The results showed that the greatest heat exchange occurs in the region near the nozzle throat. Additionally, for the analyzed engine, a thicker region around the nozzle was necessary to prevent structural failure of the material.
KEYWORDS: Rocket Engine, Liquid Propellant, Propulsion, Blowdown, Heat exchange

INTRODUÇÃO

O modo *blowdown* de funcionamento dos MFPL (Figura 1), quando se trata de hardware, é o mais simples e menos custoso. Entretanto, justamente devido a toda simplicidade, este modo de funcionamento não possui um controle sobre os parâmetros de funcionamento do motor. Assim, toda a sua operação é em regime transiente, ou seja, todos os parâmetros variam no tempo: pressão nos tanques, perda de carga nas linhas de alimentação, queda de pressão no injetor, razão de mistura, etc. Os MFPL que funcionam durante longos períodos, normalmente, possuem sistemas de refrigeração seja por *film cooling*, seja por refrigeração regenerativa via canais ou transpiração, uma vez que nenhum material é capaz de resistir às temperaturas que a câmara pode chegar (sem ser degradado/consumido) juntamente com a pressão a que o motor está submetido (VASILIEV *et al*, 1993).

O presente trabalho faz parte do desenvolvimento de um motor foguete a propelente líquido de 90 N de empuxo a nível do mar, cujo par propelente é o Peróxido de Hidrogênio 200 vol. (H_2O_2 50%) e Etanol de Combustível Automotivo (ETOH 92,5%). O objetivo deste projeto é ser um MFPL de baixo custo e extremamente simples nos quesitos hardware e funcionamento, por isso foi escolhido tal par propelente com operação *blowdown*. A Figura 1 traz o esquema simplificado do sistema de alimentação do MFPL.

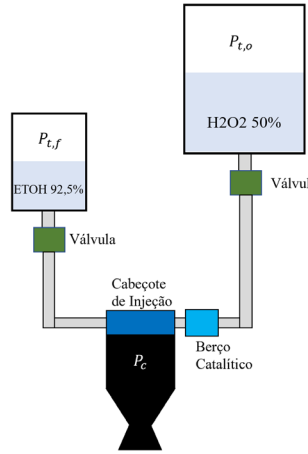
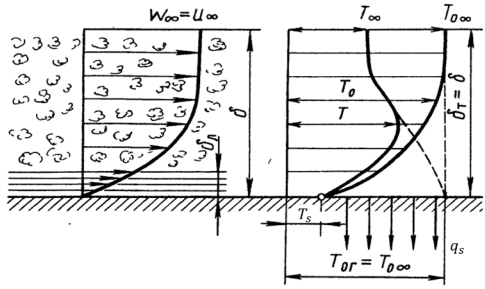


Figura 1. Esquema simplificado do sistema de alimentação do MFPL.

Dados os objetivos do projeto, o motor não possuirá sistema de refrigeração. Consequentemente, a análise da temperatura do motor em todos os pontos da câmara, após e durante seu funcionamento, deve garantir, mesmo sem sistema de controle ativo, que não haverá *hot spots* que possam ocasionar o rompimento e consequente falha estrutural.

Dentro da câmara de combustão ocorrem os 3 modos de transferência de calor: convectivo, condutivo e radiativo. O calor convectivo é proveniente do escoamento dos gases de combustão dentro da câmara; o condutivo ocorre nas paredes da câmara de combustão e o radiativo é emitido pelos gases em alta temperatura na frente de chama. A Figura 2 mostra a análise do calor convectivo utilizando os cálculos termodinâmicos na região da camada limite.

O modelo aqui utilizado para o cálculo do calor transiente possui como principais inputs a curva de pressão e de razão de mistura durante o funcionamento *blowdown*, cujo modelamento feito, inclusive dos injetores e do berço catalítico, foge ao escopo deste artigo.



a) b)

Figura 2. Ilustração das camadas limites: a) CL dinâmica – gradiente de velocidade; b) CLT – gradiente de temperatura. Adaptado de (VASILIEV et al, 1993).

Uma vez que a pressão nos tanques não é constante – conforme o propelente é consumido, o gás de pressurização é expandido e sua pressão diminui – todos os outros parâmetros do motor mudam. A pressão nos tanques, pressão de câmara, queda de pressão nos injetores, fluxo de propelentes e perda de carga nas linhas diminuem, conforme gráficos qualitativos da Figura 3.

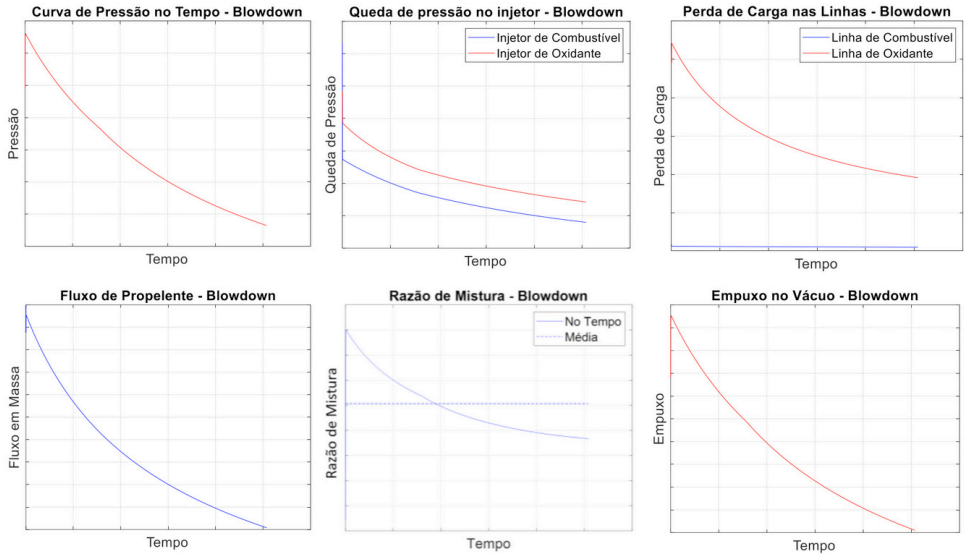


Figura 3. Gráficos característicos provenientes do modelo blowdown.

Para os cálculos iterativos de combustão, foi utilizada uma interface em MatLab, feita pelo autor, para o *Software* NASA CEA (GORDON; MCBRIDE, 1994), versão de 2004. Julgou-se adequada sua aplicação a nível de projeto uma vez que tem ampla validação no programa espacial americano mesmo não levando em conta a cinética química, uma vez que o *Software* produz soluções em equilíbrio ou composição fixada (*frozen*). Os resultados serão futuramente validados com teste em banco de ensaio.

METODOLOGIA

Para calcular as trocas de calor dentro da câmara de combustão, foram utilizadas adaptações da metodologia de Vasiliev *et al* (1993), uma vez que esta utiliza um sistema estacionário. São feitas algumas considerações para este primeiro modelo:

- Não é considerada a troca de calor condutivo na parede da câmara de combustão, portanto é adotada uma temperatura média da parede;
- Para o cálculo, a câmara é discretizada em seções transversais;
- Não é considerada a troca de calor condutivo na parede da câmara na direção longitudinal;

- A temperatura inicial da parede da câmara é a mesma do ambiente, que é a mesma dos propelentes nos tanques, adotada como 30º C;
- Não é considerada variação da razão de mistura ao longo da câmara de combustão, somente no tempo;
- O material da câmara de combustão é aço inox 304;
- Para reduzir os custos do projeto, a tubeira do motor terá formato cônico, com desempenho otimizado para nível do mar (local de teste em banco), nesta versão;

A câmara foi dividida em seções de comprimento não superior a 1/20 do diâmetro da câmara e com divisão refinada na região da garganta onde maiores gradientes são observados. A Figura 4 exemplifica esta ideia. O passo de tempo constante escolhido foi de 10 ms.

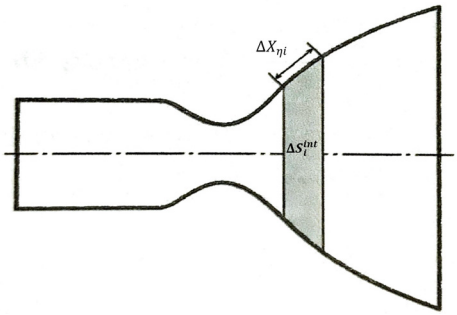


Figura 4. Divisão em seções da câmara e tubeira. Adaptado de (PEREIRA, 2010).

Sendo $q_{c_i}^j$, $q_{rg_i}^j$, $q_{rc_i}^j$ e $T_{g_i}^j$, respectivamente, os fluxos de calor convectivo, radiativo entre o gás e a parede, radiativo entre a parede e o ar externo, na seção *j* e a temperatura dos gases da combustão na iteração *i*, e T_{amb} a temperatura ambiente, o calor total que passa pela câmara segue a metodologia esquematizada na Figura 5. O cálculo de cada modo de calor é feito de forma separada.

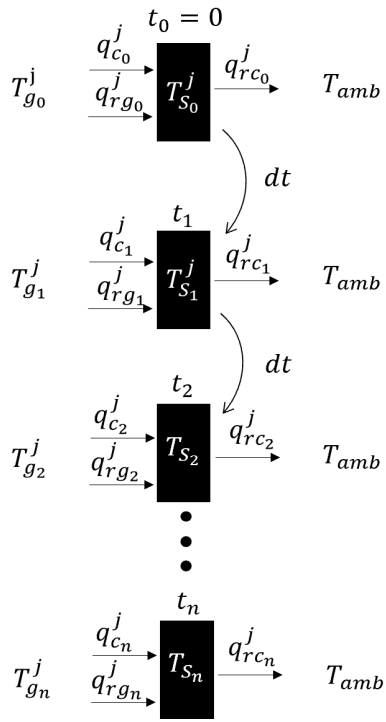


Figura 5. Metodologia de troca de calor na seção j da parede da câmara no tempo.

Fluxo de calor radiativo entre os gases da combustão e a câmara

Para este cálculo, será utilizada a hipótese de mecanismo proposta em (BAHDUR, 2019), no apêndice I. O fluxo de calor radiativo máximo é calculado segundo a equação 1.

$$q_{rg_i} = \varepsilon_{s,g}\sigma\left[\varepsilon_g T_{g_i}^4 - \Lambda_g T_{s_i}^4\right] \tag{1}$$

$$\varepsilon_{s,g} = \frac{\varepsilon_s}{1-(1-\Lambda_g)(1-\varepsilon_s)} \tag{2}$$

Na equação 1 $\varepsilon_{s,g}$, ε_s ε_g, Λ_g e σ são, respectivamente, a emissividade relativa entre o gás e a parede, a emissividade da parede, a emissividade do gás, a absortividade do gás e a constante de Stefan-Boltzmann que vale $\sigma = 5{,}6697x10^{-8} W/m^2K^4$.

A fim de obter um resultado conservador, são adotadas algumas considerações:

- Combustão completa do combustível;
- Gases não-dissociados.

Para encontrar o valor do fluxo de calor radiativo ao longo da câmara de combustão, é utilizada a metodologia, adaptada, proposta por *Л. Ф. Фролов (L.F.Frolov)* que se encontra mostrada por Vasiliev *et al* (1993), a qual consiste em:

1. O fluxo de calor radiativo na entrada da câmara será 0,25 q_{rgi} e aumentará de forma logarítmica até a distância de 50 mm da entrada, chegando no valor de q_{rgi};

2. Da distância de 50 mm após a entrada da câmara até a região subcrítica (convergente da tubeira), onde o diâmetro da seção é $1{,}2d_t$, o fluxo de calor radiativo será q_{rgi};

3. Do ponto anterior até a garganta, o fluxo de calor radiativo será $q_{rgi}\,[1\text{-}12{,}5(1{,}2\text{-}\bar{d})^2]$, sendo $\bar{d}$ o diâmetro da seção dividido pelo diâmetro da garganta d_t;

4. Na garganta o fluxo será o,5 q_{rgi};

5. Após a garganta, na região supercrítica (supersônica – divergente), o fluxo de calor radiativo será $q_{rgi}2\bar{d}^2$.

Fluxo de calor radiativo entre a parede da câmara e o ambiente

O cálculo do fluxo de calor radiativo entre a parede da câmara e o meio ambiente é mais simples e somente depende da temperatura da parede na seção *j*, segundo a equação 3:

$$q_{rc_i}^{j} = \varepsilon_{s,ar}\varepsilon_s\sigma\left[T_{S_i}^{j\,4} - T_{amb}^4\right] \tag{3}$$

$$\varepsilon_{s,g} = \frac{\varepsilon_{ar}}{1-(1-\varepsilon_s)(1-\varepsilon_{ar})} \tag{4}$$

Fluxo de calor convectivo entre os gases da combustão e a parede

O cálculo do fluxo de calor convectivo em cada seção, a cada instante, foi baseado na metodologia proposta por Vasiliev *et al* (1993). Durante a movimentação do gás dentro da câmara de combustão, devido às altas velocidades, é formada uma zona turbulenta dentro da camada limite. Entretanto, esta região não se estende por toda ela e, na região mais próxima da parede é formada uma subcamada laminar de escoamento. Este tipo de escoamento possui uma peculiaridade na qual a troca de calor pela vizinhança ocorre apenas por processos moleculares (condução e atrito). A Equação 5 rege o fluxo da troca de calor por unidade de área através da região laminar da camada limite considerando estes dois efeitos:

$$q_c = -\left(\frac{k}{C_p}\frac{\partial H_p}{\partial y} + \mu_{visc}\frac{\partial u}{\partial y}u\right) \tag{5}$$

Onde H_p é a entalpia na parede, μ_{visc} a viscosidade do escoamento, *u* a velocidade longitudinal, *k* a condutividade térmica, C_p a capacidade térmica média na camada limite e a variável *y* representa a direção perpendicular à parede da câmara.

Sendo $\frac{z_T}{z_\tau}$ uma razão proporcional aos coeficientes de troca de calor por condução e atrito e $\beta_{r\,i}^{j}$ a velocidade normalizada pela velocidade máxima, a equação final que rege a troca de calor convectivo na seção *j* na iteração *i* é, segundo a equação 6:

$$q_{c_i}^j = B_i^j \frac{1-\beta_{r_i}^{j\,2}}{\bar{D}^{j\,1,82}} \frac{\left(p_{0c_i}\varepsilon_{0c_i}\right)^{0,85}}{d_t^{0,15}} \frac{S_i^j}{Pr_i^{j\,0,58}} \tag{6}$$

$$S_i^j = \frac{\left(H_{p0r_i}^j - H_{ps_i}^j\right)\mu^{j\,0,15}_{visc_{1000,i}}}{R^{j\,0,425}_{0r_i} T^{j\,0,32}_{0r_i}\left(1+\bar{T}^j{}_{s_i}\right)^{0,595}\left(3+\bar{T}^j{}_{s_i}\right)^{0,15}} \tag{7}$$

$$B_i^j = \bar{a}_i \bar{A}_i^j (1000)^{-0,105} \tag{8}$$

$$\bar{a}_i = \frac{2^{1,18}}{4,42^{0,15}} \left(\frac{2}{\gamma_i+1}\right)^{\frac{0,85}{\gamma_i-1}} \left(\frac{2\gamma_i}{\gamma_i+1}\right)^{0,425} \tag{9}$$

$$\bar{A}_i^j = 0,01352 \left(\frac{z_T}{z_\tau}\right)_i^{j\,0,075} \tag{10}$$

Aumento de temperatura da parede

O aumento da temperatura na parede $dT_{S_i}^j$, calculada como uma temperatura média na seção de área dS^j e massa dM^j, é então calculada através do calor total na região, no determinado intervalo de tempo *dt*, segundo a equação 11:

$$dT_{s_i}^j = \frac{Q_{s_i}^j}{dM^j c_S} \tag{11}$$

$$Q_{s_i}^j = \left(q_{c_i}^j + q_{rg_i}^j - q_{rc_i}^j\right) dS^j dt \tag{12}$$

$$T_{s_{i+1}}^j = T_{s_i}^j + dT_{s_i}^j \tag{13}$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os gráficos das Figuras 6 e 7 representam os principais resultados da simulação do regime transiente do MFPL. As variáveis L_t e L_e representam, respectivamente, a localização da garganta e da saída da tubeira.

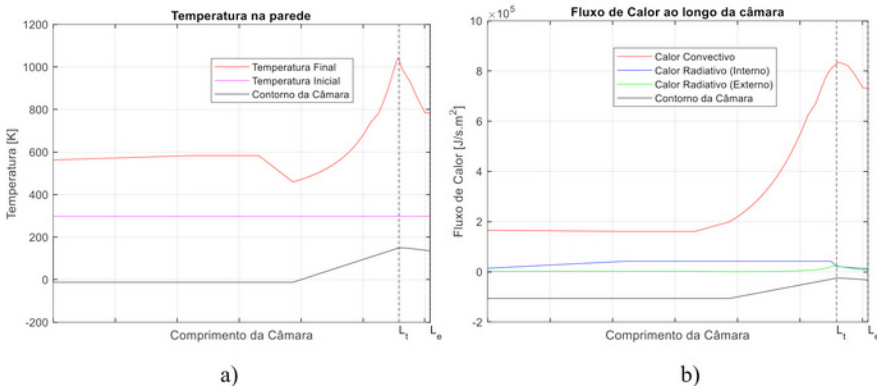


Figura 6. a) Valores de Temperatura na parede da câmara no início e no final da queima. b) Fluxo de Calor ao longo da câmara na última iteração.

Os gráficos das Figuras

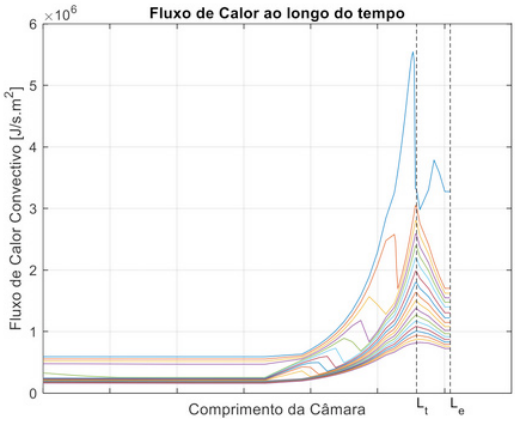


Figura 7. Fluxo de Calor ao longo da câmara em diferentes iterações durante a queima.

Acerca do gráfico da Figura 6.a , o degrau na curva de teTmperatura final (vermelho), ocorre na região próxima à entrada do convergente do motor (linha preta), que é onde há um aumento na espessura da parede, colocado propositalmente para reduzir a temperatura final do material. O valor máximo de temperatura obtido, próximo à garganta, foi de 1040 K, ou seja, por volta de 767 ºC. Isso indica que o motor ainda irá operar numa faixa segura (para o aço inox 304), conforme dados de temperatura de trabalho e de derretimento (AISI, 1979).

Além disso, o próprio modelo utilizado é conservador pelos seguintes motivos: Consideração de gases não dissociados para o cálculo da temperatura de estagnação dos gases – com isso, a temperatura se torna maior; Modelo sem considerar a evolução do calor condutivo na direção longitudinal da câmara, dessa forma todo o calor fica

aprisionado em uma seção pequena. Por mais que este modelo seja simplificado, como o motor queima durante um intervalo de tempo pequeno (menos de 10 segundos), a troca de calor condutivo não será tão intensa, apoiada, inclusive, pela inércia térmica do material; além disso, a fim de ratificar, nas simulações de Pagliuco (2003) é mostrado que o modelo russo de cálculo do fluxo de calor (semelhante ao aqui utilizado) promove resultados mais conservadores do que os modelos americano e francês.

Quanto ao fluxo de calor (na última iteração – Figura 6.b), como esperado, o pico de fluxo ocorre na região próxima à garganta. Além disso, nota-se que o máximo calor radiativo que a câmara emite para o ambiente ocorre na região do pico de temperatura da parede. Vale ressaltar, também, que a principal contribuição do aumento de temperatura do motor é devido ao calor convectivo, que chega (neste caso), até 20 vezes o calor radiativo.

O gráfico da Figura 7 ilustra as diferentes curvas de fluxo de calor convectivo ao longo da câmara em diferentes momentos da queima. Nota-se que há um decréscimo abrupto no fluxo de calor que se desloca ao longo do tempo, no sentido *upstream*. Após análise da região da descontinuidade através dos dados do NASA CEA, comparando todos os parâmetros das equações, a descontinuidade foi encontrada na entalpia na parede . Analisando os dados mostrados na Figura 9, nota-se que o ponto em específico é onde deixa de ocorrer condensação de água líquida. Este ponto é conhecido como *Wilson Point* (ponto de Wilson), como mostrado por Young (1982) e Ding; Wang; Zhao (2014). Vale ressaltar, também, que após certo momento da queima, o ponto deixa de existir e não há mais água condensada dentro da câmara.

MASS FRACTIONS	Antes			Depois
*C02	0.17325	0.17325	0.17325	0.17325
H20	0.23578	0.37292	0.37917	0.80357
*02	0.02318	0.02318	0.02318	0.02318
H20(L)	0.56779	0.43066	0.42440	0.00000

Figura 9. Dados de simulação entre os pontos antes e depois da descontinuidade.

CONCLUSÃO

Um método iterativo para cálculo do calor transiente e regime térmico para um MFPL funcionando em modo *blowdown* foi proposto. Os resultados obtidos com as simulações indicam que o MFPL irá trabalhar em uma região térmica segura para o aço inox 304, o que ainda será comparado com dados de testes em banco de ensaio. Foi verificada a existência do *Wilson Point* no funcionamento desse motor, uma vez que a quantia percentual de água nos propelentes (50% no oxidante e 7,5% no combustível) é alta. Vale ressaltar, também, que com a constante mudança dos parâmetros da combustão e do escoamento durante o funcionamento *blowdown*, o ponto de Wilson também muda de posição no sentido *upstream*.

O modelo de cálculo do calor na câmara pode ser utilizado, também, em um sistema de regime estacionário, como motores pressurizados por tanque de gás ou por turbobombas/ bombas elétricas. Para simulações com tempos de queima maiores, é necessária uma análise mais acurada da troca de calor condutivo na direção longitudinal e radial da câmara de combustão, gerando assim um modelo bidimensional.

Agradecimentos: *Agradeço a todo o time Bizu Space que auxiliou e ainda o faz, neste projeto, desde sua concepção até os testes.*

REFERÊNCIAS

AISI. A Deisgner Handbooks Series 9004: High-temperature Characteristics of Stainless Steels. American Iron and Steel Institute, 1979.

BAHDUR, Arthur. Projeto de Câmara de Combustão de Motor Foguete à Propulsão Líquida de 25kN Pressurizado por Tanque. 2019. 272f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Aeroespacial) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

DING, Hongbing; WANG, Chao; ZHAO, Yakun. An analytical method for Wilson point in nozzle flow with homogeneous nucleating. International journal of heat and mass transfer, v. 73, p. 586-594, 2014.

GORDON, S., and MCBRIDE, B. J., "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications," NASA Ref. Publ. 1311, 1994.

PAGLIUCO, Cristiane Maria de Moraes. Projeto de Câmara de Empuxo de Foguete a Propelente Líquido. 2003. 90f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

PEREIRA, Gabriel Costa Guerra. Projeto de Câmara de Combustão de Motor Foguete de 55kN a etanol e Oxigênio Líquido. 2010. 92f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

VASILIEV, A.P. *et al*. Fundamentos da Teoria e Cálculo de Motores Foguete a Propelente Líquido (*"Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей"*). Moscou: Visshaia Schola, 1993. v. 1 e 2 (Originais em russo).

YOUNG, J. B. Spontaneous condensation of steam in supersonic nozzles. Physicochemical Hydrodynamics (PCH), v. 3, p. 57-82, 1982.

ANALYSIS OF THE PHYSICAL MODELS USED FOR NUCLEAR CERAMIC FUEL

Data de aceite: 01/04/2024

D. S. Gomes
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP)
São Paulo, SP

ABSTRACT: Nuclear ceramics resist to radiation exposure and may change their thermal and mechanical properties. Many ceramic fuels, such as UO_2 and mixed oxide (MOX), are the primary fuels used in the current commercial light water reactors. Fusion reactor use of low-activity ceramics, primarily silicon carbide, will eliminate the generation of large quantities of highly radioactive waste. Silicon carbides show desirable mechanical properties and corrosion resistance at high temperatures, making them essential for nuclear fuel cladding intended for a vast range of fuels in LWRs, Gas-cooled reactors use TRISO fuel at high temperatures. Generation IV reactors scheduled for 2035 have defined seven reactor types that will operate at higher temperatures with extended burn cycles, employing innovative fuels focusing on carbide UC and nitride UN. A review of the thermal and mechanical models used in the FRAPCON codes is presented.

KEYWORDS: UN, U_3Si_2, UO_2, FRAPCON.

INTRODUCTION

The international community has widely accepted that global climate change results from greenhouse emissions [1]. Nuclear energy is a zero-emission clean energy source, more sustainable, and has a fundamental role in electric generation. It produces about 10% of the global electricity, with about 440 power reactors in operation.

Nuclear fuel systems have employed ceramic oxides as fuel and metallic cladding in thermal reactors for over six decades, showing more than sixty years of experience. Ceramic oxides, such as uranium dioxide, UO_2, and several more tolerant fuels, such as uranium nitride (UN), uranium silicide (U_3Si_2), thorium dioxide (ThO_2), and mixed oxide (MOX) fuel (U-Pu) O_2, are the most used nuclear fuels [2].

Nuclear ceramics have good resistance to radiation exposure and high temperature. Thus, nuclear energy could solve the natural shortage of resources with no carbon emissions. Since 2001, the Generation IV forum (GIF) has chosen at

least six reactor designs to replace the third generation, with over forty years of operation. GIF planned at least six advanced reactor designs to reduce costs, increase design flexibility and thermal efficiency, and reduce radioactive waste and toxicity [3].

After the nuclear accident at Fukushima in 2012, the U.S. Congress directed the pursuit of advanced fuel technologies to enhance the safety of nuclear power reactors. In 2022, through Act-2022, U.S. interagency coordination and prioritization of civil nuclear exports provided new tools for U.S. agencies to fund civil nuclear projects in partner countries.

Since the beginning of nuclear power generation in the 1950s, nuclear ceramics based on the fissionable metals U-235 and Pu-239 have been made into highly reliable fuel pellets for water-cooled and liquid-metal-cooled reactors. Ceramic materials are refractory resources: for instance, the melting point of UO_2 is around 2840°C. Second, the crystal structure allows the retention of released fission gas, and their highly variable oxygen-to-metal ratio can shift to accommodate burnup. They have excellent irradiation resistance and chemical stability in water environments. On the other hand, the ceramic-metallic (Cermet) is an emerging fuel concept for fast nuclear reactor systems designed to combine ceramic and metal beneficial properties. Ceramic fuels are used for various fast-spectrum reactors, light-water reactors (LWRs), and many other designs for the future generation of fast nuclear reactors.

Uranium nitride and carbide do not react with sodium coolant or molten lead. However, the UN and UC show poor stability in water contact. In contrast, UO_2 has good stability in water contact an is commonly used in LWRs. Comparatively, the fuel swelling under irradiation is low for UO_2, medium for UN, and U_3Si_2.

Nuclear ceramic fuel accounts for around 96% of the fuel for water-cooled reactors. In contrast, changing UO_2 to pure UN and UC has been challenging because of water incompatibility. A possible solution is to use additives such as silicide thorium, chromium, or aluminum [4], which could develop a protective corrosion layer on the surface to mitigate the oxidation of the UN.

In this context, we investigate the physical properties of ceramic fuels. We show thermal conductivity, specific heat, thermal expansion, and rapid commentary about the fission gas released.

MATERIALS AND METHODS

FRPACON is a computer code for calculating the steady-state thermal-mechanical behavior of oxide fuel rods for high burnup [5]. The primary purpose is to analyze fuel behavior under normal operational and expected transient conditions in light water reactors (LWRs). Thus, we implemented a new version for U_3Si_2 and UN.

A simple definition of primary nuclear fuel is a naturally occurring uranium fissionable isotope. U-235 is the primary nuclear fuel that permits fission with thermal neutrons and, in fission, liberates one to three neutrons. In contrast, plutonium is an artificial fissionable element obtained through the reaction of neutron capture of U-238 transmuting in Pu-239.

Ceramic fuels used in nuclear reactors

All actinide dioxides also exhibit a fluorite or CaF_2 structure. In CaF_2, eight nearest neighbors surround each metal atom, such as ThO_2, PuO_2, CeO_2, NpO_2, and AmO_2. Thus, the UO_2 reveals a fluorite structure CaF_2 at ambient conditions, which consists of a face-centered cubic arrangement. Besides, the hyper-stoichiometry of $UO_{(2+x)}$ induces point defects and clusters, producing both anion and cation sub-lattices. Crystal defects increase material creep at high temperatures under high stresses and increase accident risks. Since the 1950s, the beginning of nuclear power generation, laboratories have developed nuclear ceramics based on the fissionable materials U-235 and Pu-239 into highly reliable fuel pellets for water-cooled and liquid-metal-cooled reactors and other designs.

Ceramic fuels are refractory materials; for instance, the melting point of UO_2 is around 2800°C. Second, the crystal structure allows the retention of the released fission gas, and their highly variable oxygen-to-metal ratio can shift to accommodate burnup. In the UO_2 matrix, a small addition of impurities can change the fluorite structure, the stoichiometry of UO_2, density, and grain size. Table I shows the thermal properties of ceramic fuels in the temperature range of 25°C, such as uranium densities, thermal conductivity (k), and melting point (MP).

Fuel	MP (°C)	Density ($gU.cm^{-3}$)	*k* ($W.m^{-1}°.C^{-1}$)
UO_2	2800	9.6	6.02.5
U_3Si_2	1665	11.3	1527.5
UN	2630	14.3	15.028.0
UC	2768	13.0	12.616.0
ThO_2	3378	8.45	102.45
UN-20PuN	2495	13.5	14.023.0
UC-20PuC	2302	12.9	16.022.0
UO_2-20PuO_2	2745	9.7	8.913.42

Table I. Thermal properties of ceramic oxides

The current nuclear fuel system, which consists of UO_2 fuel and Zr-alloy cladding, can produce successive events similar to those observed in Fukushima Daichi, 2011. During the Fukushima events' timeline, the high fuel temperature and zircalloy oxidation over 900°C in contact with water steam. As a result, oxidation produces a large amount of hydrogen, followed by hydrogen ignition or blasting, releasing radioactive materials into the

environment. Uranium silicides, U_3Si_2, is a ceramic fuel considered a good contender for ATF fuels because of their high thermal conductivities and uranium densities compared to UO_2. The thermal conductivity increases with increasing temperature. Figure 1 displays the fuel densities of nuclear ceramics.

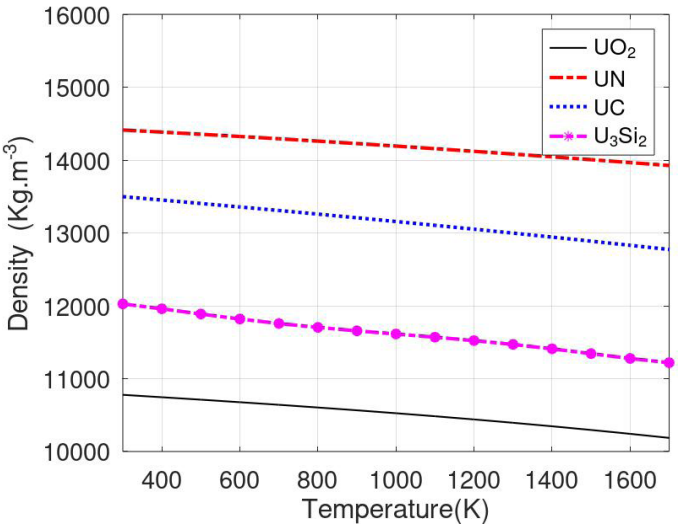


Figure 1: Density of ceramic fuels versus temperature

Higher thermal conductivity generally results in lower fuel centerline temperatures and lower stored thermal energy. The heat transfer equations show three related properties, thermal conductivity (*k*), thermal diffusivity (*α*), and specific heat capacity (*cp*), valid for pure and composite materials with composites. For determinate, composite ceramic fuel properties commonly employ a derivative of the empirical Koop Neuman rule (KNR), known as the mixture rule. Crystallography and metallurgy adopted Vergard's law, which resembles KNR. Equation (A) represents the relationship between thermal diffusivity and thermal conductivity.

$$k = \alpha \times \rho \times C_p \tag{A}$$

where α is the thermal diffusivity ($m^2 \cdot s^{-1}$), k represents thermal conductivity ($W.m^1.°C^{-1}$), C_p is the specific heat ($J \cdot kg^{-1} \cdot °C^{-1}$), and ρ expresses the density ($kg \cdot m^{-3}$), and the thermal diffusivity describes the speed at which heat travels through a material.

The fuel fragmentation process occurred above 1200°C. Nitride fuel could disassociate at lower temperatures. Nitride composite fuel has shown lower swelling under irradiation than UO_2. Initially, a large range of ceramic fuels such as UN and UC does not react with sodium coolant or liquid metals. Figure 2 exhibits ceramic fuel thermal conductivities as a temperature function. Figure 3 illustrates the heat capacity of ceramic fuels.

Since 1960, uranium mononitride (UN) has awakened interest in high-temperature space propulsion programs and advanced fast breeder reactors. International research programs investigated nitride fuels during the 1960s and 1970s, restricting sodium and helium-cooled fast reactors working with UN and (U-20%Pu). UN has been an alternative for fast reactors. Under regular operation, the UN suffers cracking and extensive fuel fragmentation during startup and shutdown. Figure 2 exhibits ceramic fuels' thermal conductivity as a temperature function. Figure 3 illustrates the heat capacity of ceramic fuels.

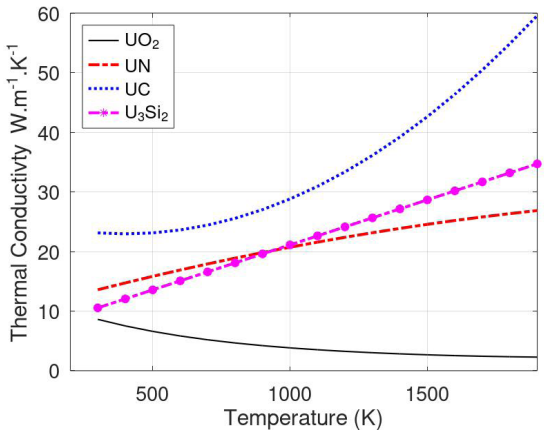


Figure 2: Thermal conductivity of ceramic fuels used in light water reactors.

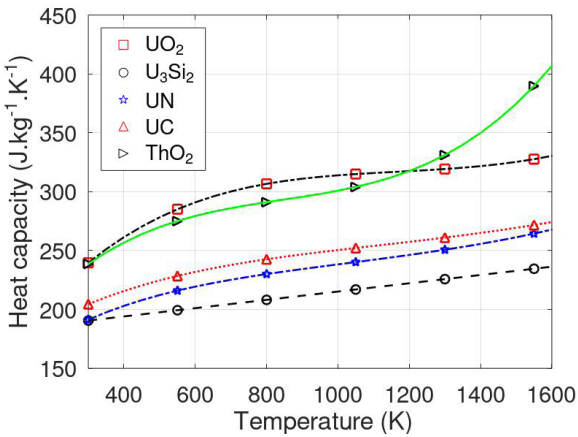


Figure 3: Heat capacity of ceramic fuels usually employed in reactors.

Initially, a large gamma of ceramic fuels, such as UN and UC, does not react with sodium coolant or liquid metals. The fuel fragmentation process occurs above 1200°C. Nitride fuel could disassociate at a lower temperature. Nitride composite fuel has shown lower swelling under irradiation than UO_2.

However, UN and UC show poor water or steam contact stability. In contrast, UO_2 has good stability in water contact, commonly used in LWRs. Comparatively, the fuel swelling under irradiation is low for UO_2, medium for UN, and U_3Si_2 but high for UC. In light water reactors (LWRs), there are problems, including the reactivity of isotope ^{14}N, because of the high neutron capture cross-section. A solution adopted uses enriched nitrogen ^{15}N, which has a lower absorption cross-section [6]. Besides, because of the tendency of UN powders to oxidize in contact with air or water steam environments, this reaction is exothermic with water, resulting in fuel pellet pulverization followed by relocation. The UN powders showed the capacity to self-ignite at about 260°C, producing a mixture of U_3O_8, UO_2, UO_3, U_2N_3, and UN. Figure 4 displays the thermal expansion coefficient versus the temperature of ceramic fuels used in nuclear generation.

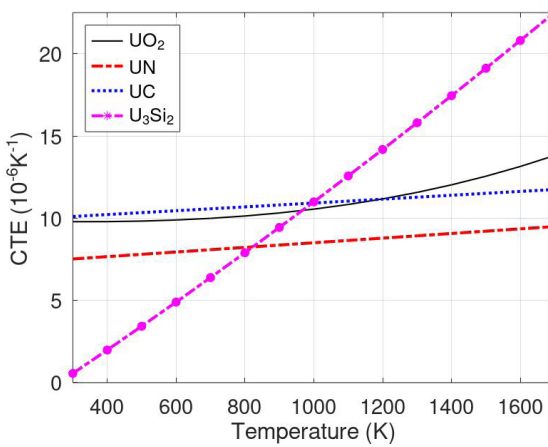


Figure 4: Coefficient of thermal expansion (CTE) of ceramic fuels.

On the other hand, the Russian Federation is developing BREST-300, which uses liquid metal sodium as a coolant. It is a fast reactor of 300 MWe that operates with (PuN–UN) fuel enrichment of about 13.5%. Also, other fast reactors with liquid metal as a coolant must operate using (Pu, Zr)N, (U-20%Pu) fuel, and UN. Moreover, carbide fuels are unsuitable for LWR because of their incompatibility with water coolantsThe energy generated from natural uranium using fast breeder reactors is about 60 times greater than that produced by LWRs, even after allowing for losses in the fuel cycle [7]. In 1968, the American Program developed a liquid metal fast breeder reactor (LMFBR) program using sodium coolant with dominant breeder technology. Into the core, they used fuel pins operated with mixed oxides (U-20% Pu)C in sequence using mixed uranium and plutonium (U-Pu)C carbides. Fuel pins used stainless steel type 316 cladding. The target of the LMFBR Program focused on nuclear power plants with capacities of 1000 MWe in operation in 1970 or early 1980. Uranium carbide is a potential fuel option for some Generation IV reactors, such as the gas-cooled fast reactor, which has been intensively researched.

In the last decade, the ATF plan has tested uranium nitride composed with a secondary phase, based on UN-U_3Si_2 or UN-U_3Si_5, also uranium diborides system UN-UB_2 or UN-UB_4 among other dopant phases, which might shield the nitride and carbide phase from undesirable water corrosion [8]. Thus, new research on silicides, carbides, nitride, diborides, and mixed compositions has arisen for light water reactors (LWRs). In addition, advanced alloys such as iron-chromium-aluminum (FeCrAl) and silicon carbide (SiC) are possible replacements for standard zircalloy used in the last decades [9].

The current U-Si phase diagram is characterized by seven intermetallic compounds (U_3Si, U_3Si_2, U-Si, U_3Si_5, $USi_{1.88}$, USi_2, and USi_3) of which only the U_3Si compound is well understood. However, U_3Si_2 can react with hydrogen, resulting in the degradation of material properties. Uranium silicides have shown advantages as the densities for U_3Si of 15.4 $g{\cdot}cm^{-3}$ and U_3Si_2 of 12.2 $g{\cdot}cm^{-3}$ have maximum uranium loadings for U_3Si and U_3Si_2 of 14.6 $g{\cdot}cm^{-3}$ and 11.3 $g{\cdot}cm^{-3}$ respectively.

The oxidation of UO_2 and U_3Si_2 in air demonstrated that U_3Si_2 has a higher onset oxidation temperature (~450°C) than UO_2 (~410°C). In contrast, U_3Si_2 has a much higher reaction enthalpy (~15 times) than UO_2. Besides, the steam corrosion resistance of U_3Si_2 was inferior to that of UO_2 at high temperatures.

UN and U_3Si_2 composites manufactured by conventional vacuum sintering are subject to microcracks because of a mismatch between silicide and nitride thermal expansion phases. The innovative fuel UN-U_3Si_2 manufactured with a strategic formulation proposed contains 50 wt% UN and 50 wt—% U_3Si_2, showing excellent thermal conductivity and enhanced strength and fracture toughness.

Carbides of uranium and thorium produce mixed carbides such as UC-PuC compared with mixed oxides $(U\text{-}Pu)O_2$, showing higher thermal conductivity and higher heavy metal densities. However, advanced ceramic fuels, including (U-Pu)C carbides and (U-Pu)N nitride have a more expensive and complex sintering route than UO_2.

The Accident tolerant fuel (ATF) program has tested advanced materials to substitute UO_2 and zirconium alloys in the future [10]. ATF fuel must tolerate the loss of active cooling in the reactor core for a long time while maintaining or improving fuel performance during normal operations and transient states beyond design basis events.

RESULTS AND DISCUSSION

The Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) developed the FRAPCON code for the United States Nuclear Regulatory Commission (US NRC) to license light water reactors in the 1970s. Since 2019, the an upgraded version has added new fuels, uranium metal alloys, and ferritic alloys, such as iron-chromium-aluminum (FeCrAl) alloys. Besides, it is an independent audit tool for licensing nuclear power plants. Thus, a FRAPCON simulation showed that the innovative designs of the AP-1000 are based on simple principles for design-basis accidents. Table II shows a few input parameters for the simulation.

Nuclear Parameter	Values
Pellet outer diameter (mm)	9.50
Fuel density (%)	95.2
Cladding thickness (mm)	0.573
Cold plenum length (mm)	127
Gap thickness (mm)	0.081
Cladding roughness (mm)	0.00050
Fuel roughness (mm)	0.00199
U-235 enrichment (%)	4.8
Pitch, rod to rod (mm)	12.60
Mass flux of coolant ($kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$)	3.3906
Primary coolant flow rate ($kg \cdot s^{-1}$)	14300

Table II: Nuclear Parameters

FRAPCON permits the simulation with oxide fuel (UO_2 and $(U\text{-}Pu)O_2$) and zirconium-alloy cladding such as zircaloy-2, zircaloy-4, ZIRLO®, Optimized ZIRLO™ and M5™).

AP1000 uses light water as a primary and secondary coolant, and water is a moderator. The core coolant inlet temperature is around 279.4°C, and the outlet temperature is 324.7°C, with an average increase of 45°C. The unit produces a net power output of 1100 MWe and an average core power density of 109.7 $MW \cdot m^{-3}$.

This study used the adapted fuel code FRAPCON to change the standard fuel system to U_3Si_2/FeCrAl and UN/FeCrAl. Thus, based on PWR 17x17 executed, a simulation as the benchmark calculation for the UO_2/ZIRLO standard fuel system compared with the proposed system, the U_3Si_2/FeCrAl. Figure 4 illustrates the burn cycle behavior, which starts the burn cycle with a high linear power value of 37.5 $kW \cdot m^{-1}$ and decays along the fuel burn cycle.

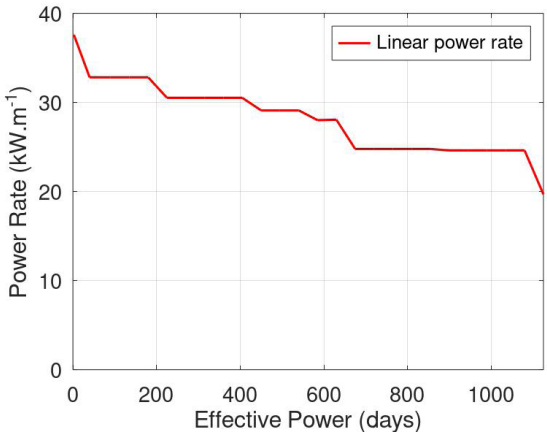


Figure 4: Linear power rate used in burn cycle of 1125 days.

The linear power rate used was (37.5, 32.8, 30.5, 29.1, 28, 24.7, 19.68, and 16.4) $kW \cdot m^{-1}$ in 1125 days of irradiation, achieving 68 $MWd \cdot kgU^{-1}$. The burn cycle follows safety recommendations, limited to 68 $MWd \cdot kgU^{-1}$. The fuel temperature must decrease as a function of the reduction in the linear power rate used. When using the other fuels, there is a slight variation in the burning since the uranium density is higher for UN and U_3Si_2 compared with UO_2. Despite the difference behavior between zirconium-based alloys and FeCrAl ferritic alloys, we can see a reduction in fuel temperature. Figure 5 illustrates the average fuel temperature for the fuel system used.

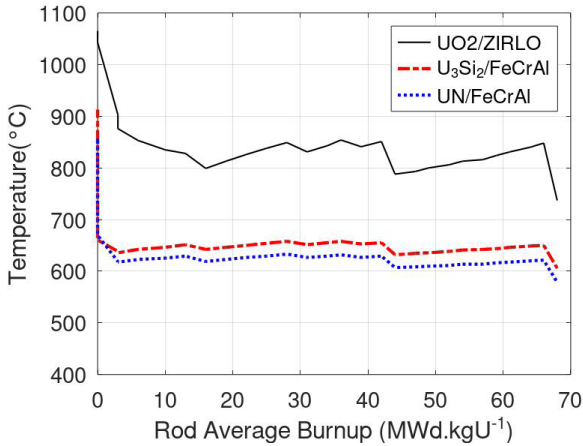


Figure 5: Average fuel temperature for fuel system used in simulations.

Figure 6 shows the fission gas release in each case, UO_2, U_3Si_2, and UN, using FeCrAl.

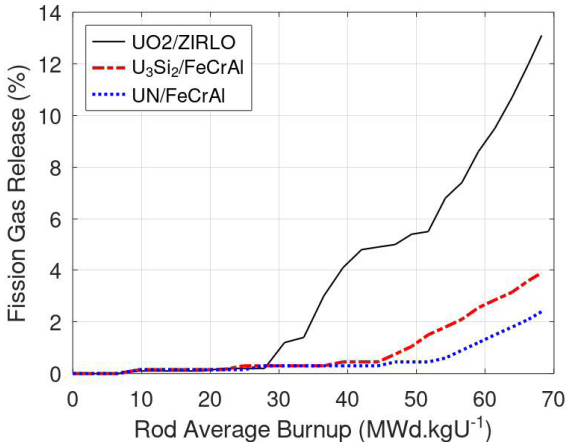


Figure 6: Fission gas release in each case UO_2, U_3SI_2, and UN, using FeCrAl.

The fuel temperature showed a significant reduction because of the higher thermal conductivity of UN and U_3Si_2, over five times the thermal conductivity of UO_2, in a range of temperature operation between 280°C and 325°C. Comparatively, the thermal conductivity of UN is higher than U_3Si_2 by 13% at the same temperature range.

An interesting factor is that while UO_2 has its thermal conductivity reduced with increasing temperature, the other options act, on the contrary, increasing the thermal conductivity of U_3Si_2 and UN. However, the results from the simulation are compatible with the theoretical values.

The plenum of the fuel rod is designed to contain part of the xenon and krypton generated in fission in a restricted volume of each rod. However, the case generation process strongly depends on temperature. Therefore, we can deduce a drop in pressure for fuels with better thermal conductivity. Figure 7 illustrates the plenum pressure versus burn cycle, achieving a 68 MWd·KgU-1 limit.

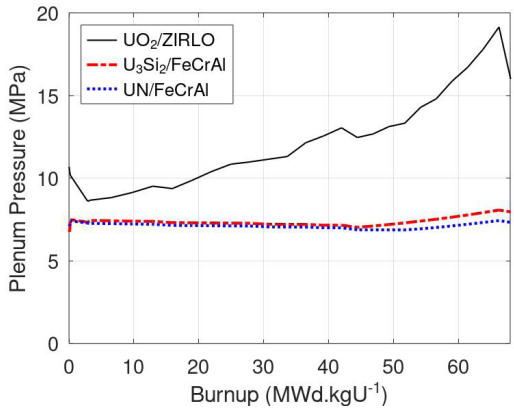


Figure 7: Plenum pressure compared with U3Si2 and UN.

CONCLUSIONS

Ceramic fuel has offered a clean and efficient means of producing electricity through various oxides and metallic fuels. The analysis of simulation results shows a strong unity with the thermal properties of the fuels.

The temperature of fuel suffers a significant reduction. It also reduces fission gases because of generation, which depends on temperature, and increases the production with increasing temperature. However, the great advantage of using U_3Si_2 or UN is the high thermal conductivity coupled with the higher uranium density. The counterpart of the used system also has a problem or penalty because of the more extensive cross-section for thermal neutron flux.

Comparatively, the properties of zirconium base alloys show benefits and drawbacks. The cross-section of zircaloy is ten orders of magnitude less than iron-chromium-aluminum FeCrAl, like the commercial KANTHAL® APMT.

In the simulation, the execution does not correct the cladding thickness but can reduce the clad thickness and increase the pellet radius. However, U3Si2 contains a higher uranium density than UO2 fuel, which provides a potential solution for all alternative cladding with a more extensive thermal neutron absorption cross-section than zirconium alloys. Besides, the big problem with the UN comprises the exothermic reaction between the UN and water. In this context, proposals are being made to use the UN with additives such as UN-U_3Si_2 or UN-U_3Si_5-UB_2.

ACKNOWLEDGMENTS

The Nuclear and Energy Research Institute (IPEN/CNEN/SP–Brazil) supported this investigation. The author also recognizes the Nuclear Engineering Center (CEN) for research potential in nuclear ceramic fuel.

REFERENCES

[1] I. Khan et al., Role of alternative and nuclear energy in stimulating environmental sustainability: impact of government expenditures. Environmental Science and Pollution Research, vol. 29(25), (2022) 37894-37905.

[2] D. Frazer et al., High-temperature mechanical properties of fluorite crystal structured materials (CeO_2, ThO_2, and UO_2) and advanced accident tolerant fuels (U_3Si_2, UN, and UB_2). Journal of Nuclear Materials, 554, (2021), 153035.

[3] L. Zhan et al., Development and outlook of advanced nuclear energy technology. *Energy Strategy Reviews*, 34, (2021) 100630.

[4] A. Herman, A., & C. Ekberg, A uranium nitride doped with chromium, nickel, or aluminum as an accident tolerant fuel. Res. Rev. J. Mater. Sci, 5(4), 83, (2017).

[5] K. J. Geelhood et al., A computer code for the calculation of steady-state, thermal-mechanical behavior of oxide fuel rods for high burnup. In Pacific Northwest. National Laboratory Richland, Washington, (2015).

[6] R. Konings., & R. Stoller. *Comprehensive nuclear materials*. Elsevier, (2020).

[7] B. Qiu et al., A review on thermohydraulic and mechanical-physical properties of SiC, FeCrAl, and Ti_3SiC_2 for ATF cladding. Nuclear Engineering and Technology, 52(1), (7), pp. 1-13.

[8] W. Zhou, & W. Zhou. Enhanced thermal conductivity accident tolerant fuels for improved reactor safety–A comprehensive review. Annals of nuclear energy, vol.119, (2018), pp. 66-86.

[9] W. A. Hanson et al. Post-irradiation examination of low burnup U_3Si_5 and UN-U3Si_5 composite fuels. Journal of Nuclear Materials, vol. 578, (2023), pp. 66-86,

[9] W. Jiang et al., Ceramic nuclear fuel fracture modeling with the extended finite element method. Engineering Fracture Mechanics, 223, (2020) 106713.

[10] S.J. Zinkle, Accident tolerant fuels for LWRs: A perspective, Journal of Nuclear Materials,*448*(1-3), 374-379, (2014)

AN INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF TRISO FUEL AND MOLTEN FLUORIDE SALTS

Data de aceite: 01/04/2024

Daniel de Souza Gomes
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP)
São Paulo,SP, Brazil

ABSTRACT: Public opinion has reached a growing consensus that nuclear energy could be an inflection point for mitigating global warming and the shortage of natural resources in the future. The energy demand suffers a rapid increase and can duplicate itself up to 2035. Since 2002, Generation IV has researched at least six designs to substitute nuclear power plants with forty years of operation. A fluoride high-temperature reactor is designed to use tri-structural fuel formed of graphite-matrix-coated particles with a mixture of lithium and beryllium fluorides as a coolant, commonly called FLiBe. However, concisely, the heat transfer models applied to nuclear reactors depend on the Prandtl number correlated to coolant and usage conditions. A pebble-bed fluoride-salt-cooled high-temperature reactor, Mark-1, comprises a conceptual project developed at Berkeley in 2016. Then, it performs a theoretical analysis of the core reactor, where we review the thermal properties of fuel and coolant. It compares generation-IV reactor design analysis with options such as heavy liquid metals, coolants, molten salt reactors, and conventional fuels.

KEYWORDS: Molten salt reactor, FHR, FliBe, FLiNaK, TRISO

INTRODUCTION

Nuclear power is a valuable option for electric power generation since it produces no carbon emissions and is a well-established commercial technology (Krey et al., 2014). In the 1970s and 1980s, nuclear power units expanded significantly worldwide (Carrara, 2020). Because of the growth of renewable energy, government agencies have sponsored several programs for solar and wind that are driving the future of power generation (Cousse, 2021). After the turn of the millennium, there was a resurgence of interest in nuclear energy as a source of electricity. In 2021, about 60 power reactors were under construction in 15 countries, particularly China, India, and Russia. Nuclear units can take several

building years, and the operational life of facilities is around 40 years. Currently, pressurized water reactors (PWRs) and boiling water reactors (BWRs) dominate electric generation scenarios, supplying over 10% of the world's electricity (Ho et al., 2019).

Today, 410 nuclear power reactors operate in 32 countries, with a capacity of about 368 GW (Pioro et al., 2023). Light-water reactors (LWRs) operate with uranium dioxide (UO_2), a solid fuel built during the third generation of reactors, and many have served for over 40 years. PWRs and BWRs operate with water coolant at temperatures around 275 °C and 283 °C, respectively, with high pressures of 15 MPa and 7 MPa and a thermal efficiency of less than 35%. (Fernández-Arias et al., 2020).

In 1946, the US Army Air Force began the Aircraft Nuclear Propulsion (ANP) program to enable supersonic long-range flight. The ANP and the preceding Nuclear Energy for the Propulsion of Aircraft (NEPA) plan had a cost of $24 billion until May 1951. However, it limited American uranium reserves in the 1950s. With fissionable U-235 and fertile U-238, natural uranium contains 99.28% U-238 and 0.72% U-235. The enrichment procedure was expensive and time-consuming, meaning that 140 tons of natural uranium were needed for every U-235 produced. Then, Eugene Wigner and Alvin Weinberg, two researchers from Oak Ridge National Laboratory (ORNL), proposed the Molten Salt Reactor (MSR). They presented the concept of liquid fuel using thorium to convert to the fissile isotope U-233 (MacPherson, 1985).

In 1954, carried out by the US Air Force, the Aircraft Reactor Experiment (ARE) was the initial prototype. The MSR showed a thermal power of 2.5 MW and operated in the thermal spectrum. MSR was the first reactor that used liquid fuel and coolant, using the molten sodium fluoride salt $NaF\text{-}ZrF_4\text{-}UF_4$ (53.09-40.73-6.18 mole%). Molten salt has a density of 416.5 kg/m^3, contains U-235, and uses beryllium oxide as a moderator. The ORNL built and operated the Molten Salt Reactor Experiment (MSRE) (Haubenreich et al., 1970). MSRE operated with alkali fluorides like lithium-beryllium fluoride ($^7LiF\text{-}BeF_2$) or FliBe between 1965 and 1969. MSRE was a test reactor at ORNL with an output of 7.4 MW using graphite as a moderator. In short, the Molten-Salt Reactor Program (MSRP), run by ORNL from 1958 to 1976, developed much of the molten salt technology (Singh et al., 2018). In 1968, three years later, it was the first reactor to operate on U-233. Since 2001, the Generation IV International Forum (GIF) has researched future nuclear designs. The GIF has representatives from 13 countries and comprises Euratom, representing 27 European Union members.

Since then, the GIF initiative has promoted research focused on six types of reactors for further international study and development. Summarily, Generation IV systems show four broad targets: sustainability, economics, safety and reliability, physical protection, and proliferation risk (Zohuri, 2020; Schulenberg, 2022). Among the six candidates proposed in the GIF, the molten salt reactors show two main subclasses (Serp et al., 2014). Thus, the MSR concept provides advantages over other technologies. Among these benefits, it lists

meltdown mitigation through passive cooling, negative temperature coefficients of reactivity, and operating near atmospheric pressure. The lowest parasitic neutron capture is essential for achieving negative void reactivity feedback. FLiBe is vital for liquid fuel because of its high potential to dissolve Th-232, Pu-239, and U-235. Besides, it has a melting and boiling point that should allow operation at a thermal limit of around 1000 °C. Further, fluoride high-temperature reactors (FHR) combine the operation with spherical fuels (Seifried et al., 2019). The GIF shows sodium fast reactors (SFRs) as an option because they allow high power densities.

Today, the MSRs permit operating with liquid or solid fuel to burn actinides and produce fissile fuels (breeding). High temperatures allow electricity generation and hydrogen production. These reactors have used Tri-Structural ISOtropic (TRISO) fuel (Elder & Allen, 2009; Satvat et al., 2021). Then, the long experience gained in high-temperature gas-cooled reactors (HTGRs) combined with the molten salts changed from helium's coolant to FliBe. The VHTRs used an iodine-sulfur method composed of three chemical reactions. Start with the Bunsen reaction, which produces sulfuric acid and hydrogen iodide when water, sulfur dioxide, and iodine react. Then, it followed the H_2SO_4 section and got the target iodidric acid (HI) and hydrogen gas. (Wang et al., 2021).

Besides, GIF promotes a closed fuel cycle that can reprocess burned fuel and partly reuse it. The remaining uranium, plutonium, and waste isotopes carry proliferation threats in closed fuel cycles. In 2011, the Chinese government started a liquid fluoride thorium reactor, the Thorium-Breeding Molten-Salt Reactor (TMSR). TMSR-LF1 operates with liquid fuel fluoride molten salt mixed with thorium and uranium (^{7}LiF-BeF_2-ThF_4-$^{233}UF_4$). The power generated is 2 MW and permits online reprocessing and refueling. TMSR shows a substantial neutron economy operating at atmospheric pressure. The second prototype is the TMSR-SD1 with 10 MWth using TRISO fuel with a diameter of 6 cm and FLiBe as coolant. China plans to change its thorium energy operations in 20–30 years (Xu et al., 2019).

In 2018, Kairos Power (KP) introduced the conceptual design of the KP-FHR, which generates 140 MW using TRISO fuel (Stavat, 2021). KP-FHR is a pebble bed with an enrichment of 19.75% U-235 and FLiBe as a coolant (Blandford et al., 2020). Chloride salts produce less tritium than fluoride salts. Startups have created various MSR designs, such as Moltex Energy, Elysium Industries, and TerraPower. Chloride salts like NaCl-UCl_3 became a reference to being a desirable carrier salt because of their high solubility power. Besides, fluoride salt has a high heat capacity, double sodium, and a thermal conductivity double that of water. This way, fluoride salts improve heat transfer with a high thermal efficiency of 42.5% compared with 40% in sodium reactors (Novak et al., 2021).

This research analyzes the TRISO fuel coupled with the molten salts, which shows better thermal performance at high temperatures. Molten salts such as fluoride, nitrate, chloride, and carbonate salts have been suggested for heat transfer, thermal energy storage, and nuclear applications involving several options. In this way, the physical properties of

molten salts, such as melting point, thermal conductivity, specific heat capacity, enthalpy, and Gibbs free energy, are reviewed. They also involve a simple revision of the fluid properties, like the viscosity of molten salts. In addition, it analyzes the Reynolds number varying from 10000 to 50000 and the Prandtl number between 10 and 27, with implications.

MATERIAL AND METHODS

The prototype HTGR was the Peach Bottom Unit 1, which operated from 1966 to 1974 using helium as a coolant. In the 1980s, the US government established HTGR research and development plans. The Germans incorporated spherical fuel elements simultaneously with the core design, including ceramic-coated fuel particles. There are essential differences in the properties of refrigerants. Sodium coolant operates at 500 °C at 15 MPa. Fast gas reactors work with helium at 500 °C with 7.1 MPa for thermal and fast neutron spectra. Further, fluoride salts operate at 600 °C with 0.23 MPa. Table 1 lists a few properties of the fluoride salts, helium gas, and liquid sodium.

Physical properties	He 7.5 MPa	Na (700 °C)	$^{7}LiF-BeF_2$ (66-34)	$NaF-ZrF_4$ (59.5-40.5)	$^{7}LiF-NaF-KF$ (46.5-11.5-42)	$^{7}LiF-ThF_4$ (72-28)
Weight (g/mol)	4	23	33.0	92.7	41.3	87.99
Melting point (°C)	-272.2°C	98	459	500	454	555
Boiling point(°C)	-268.93	883	1727	1350	1570	1674
Density (Kg/m^3)	3.8	845	1.994	2.8264	2.718	4470
Heat capacity (kJ/kg·K)	5.19	1.27	2.414	1.161	1.151	1.05
Thermal conductivity (W/m·K)	0.281	62	1.0	0.49	0.92	1.2
Viscosity (cp)	0.041	0.182	5.6	5.1	2.9	16.74

Table 1. Comparison of a few physical properties of the fluoride salts, helium gas, and sodium as coolants.

The intention to produce hydrogen needs the advantages offered by ceramic-coated particle fuel and the operation of FLiBE at high temperatures at low pressure. The High-Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) comprises a gas-cooled reactor operating at an outlet temperature of 850°C to 950°C. HTTR shows a prismatic core design similar to the Chinese HTR-10, first implemented in Japan in 1991 (Suh et al., 2022). After German experience in gas-cooled reactors was gained, South Africa developed the pebble bed modular reactor (PBMR) between 1994 and 2009 (Reitsma). The design resembled HTTR, adopting a pebble bed, helium cooling, and graphite moderation. Oak Ridge constructed the Advanced High-Temperature Reactor (AHTR) along the same line in 2006. Like the VHTR, the AHTR uses helium as a coolant and runs at 900 °C. Besides, the AHTR design supports coolants such as $^{7}LiF-BeF_2$, $NaF-BeF_2$, LiF-NaF-KF, and $NaF-ZrF_4$.

High-temperature reactors

The High-Temperature Reactor Dragon Project began operations in the United Kingdom at Winfrith in 1966. The Dragon prototype generated 2 MWe, starting a new fuel design: low-enriched coated-particle fuel, prismatic graphite, and helium as a coolant. With an inlet gas temperature of 350 °C and an outlet temperature of 750 °C, the mass flow is 10 kg/s at 2.03 MPa. The American initiative started with high-temperature reactors based on coated particles surrounded by pyrolytic carbon. During the 1960s, American HTRs emerged, such as Peach Bottom with 40 MWe in 1967 and Fort Saint-Vrain (FSV) in Denver, Colorado, with 15 MWe. In contrast, the German Jülich Research Center built the AVR based on a pebble bed design using solid fuel containing thorium, uranium, and helium as coolants. In 1985, two decades later, AVR operated the Thorium High-Temperature Reactor (THTR-300). THTR generated 295 MWe operating with 675,000 balls of 6 cm diameter and helium as a coolant. Table 2 displays high-temperature helium reactors.

Physical properties	Dragon	AVR	FSV	Peach Bottom	THTR-300
Operation	1966-1975	1969-1988	1979-1989	1967-1974	1983-1987
Power (MWth)	20	46	842	115	296
Fuel kernel	UO_2	UO_2-ThO_2	ThC	UCO	UO_2-ThO_2
Fuel coating	TRISO	TRISO	Carbide	TRISO	TRISO
Fuel arrangement	Prismatic	Pebble bed	Prismatic	Prismatic	Pebble-bed
Helium pressure (MPa)	2.0	1.1	4.8	2.	4.0

Table 2. Classification of high-temperature reactor designs using several fuels and arrangements.

The HTGR operates at temperatures between 750 and 950 °C and employs graphite as a moderator. Two core types employed in HTGRs are prismatic blocks and spherical fuel using helium as a coolant. A pebble-bed high-temperature gas-cooled reactor (PB-HTGR) was the first design. The Pebble-Bed Fluoride-Salt-Cooled High-Temperature Reactor (PB-FHR) is the second one. The VHTRS and HTGRs implemented the thermochemical sulfur-iodine cycle at high temperatures of 950 °C. Table 3 depicts a comparison of the thermal parameters of high-temperature designs.

Reactors Design	MK-1	MSFR	AHTR	MSR FUJI	PBMR
Power (MWth)/(MWe)	236/100	3000/1500	3400/1530	450/200	400/175
Fuel Material	TRISO/UCO	$^{233}UPuF_3$-ThF_4	1530	$^{233}UF_4$-ThF_4	UO_2
Coolant	^{7}LiF-BeF_2	^{7}LiF-BeF_2	^{7}LiF-BeF_2	^{7}LiF-BeF_2	Helium
Moderator	Graphite	-	Graphite	Graphite	Graphite
Inlet/outlet temperature (°C)	600-700	650-750	650-700	565-704	250-750
Power density (MWth/m^3)	22.7	48	12.9	7.3	4.0

Table 3. High-temperature thermal designs FHR-PB, AHTR, MSR, PBMR, and the fast design MSFR.

Next-generation designs have proposed TRISO-coated particle fuels in several cases. Today, there are prototypes, such as the KP-FHR of Kairos Power, the Xe-100 (X-energy), and the eVinci of Westinghouse, adopting TRISO fuel. Features include operation at low pressure at high temperatures, as power densities ranging from 10 to 30 MW/m3 are higher than those of modular helium reactors below 5 MW/m^3.

The TRISO fuel pebbles used in the FHR-PB and Mark-1 have a diameter of 3.0 cm, which is half that of the pebbles used in helium-cooled reactors. As a result, FHRs combine designs using pebbles made from carbon spheres and FLiBe as coolant (Scarlat et al., 2014). At atmospheric pressure, Mark-1 runs with a mass flow rate of 976 kg/s, a $^7LiF\text{-}BeF_2$ core inlet temperature of 600 °C, and a core outlet temperature of 700 °C. Mark-1 works on advanced Firebrick Resistance-Heated Energy Storage (FIRES) (Stack et al., 2019). FIRES is a thermal energy storage concept permitting power generation flexibility as a function of demand. Nuclear Air-Brayton Combined Cycle (NACC) and FIRES store heat power in ceramic firebricks (Qu et al., 2022).

Several MSRs operate on the thermal spectra, with fuel dissolved in the molten salt forming a liquid fuel. In the HTGR and FHR, the pebbles are coated with particle fuel using graphite as a moderator. Helium-cooled reactors permit an extended range of temperatures inside the pebble bed, from a 250 °C inlet temperature to 750 °C for the core outlet (Li et al., 2023).

Pyrocarbon layers of the pebble fuel

The TRISO fuel is practically indestructible and highly stable under regular operations and accident scenarios (Helmreich et al., 2022). The TRISO fuel can withstand all conditions for normal operations and accident scenarios because it is practically indestructible and highly stable under radiation (Helmreich et al., 2022). TRISO fuel contains five layers of pyrolytic carbon surrounding nuclear fuel cores. In the center, we have spherical fertile particles. Next, it has a low-density buffer layer surrounding the core and is a porous medium to absorb fission products.

The buffer layer is a container for fission products without transferring stress forces to the outer layers. Buffer layers show thicknesses of 85 μm to 94 μm with a low density of 1.0 g/cm^3 and contain about 50% void. The first pyrolytic carbon (PyC) layer has thicknesses ranging from 37 μm to 41 μm and densities around 1.9 g/cm3. The silicon carbide (SiC) layer showed thicknesses ranging from 36 μm to 51 μm. SIC provides structural support to avoid deformation under irradiation in the carbon layers. The outermost pyrolytic carbon (OPyC) layer has a thickness of 40 μm to protect the SiC during manufacturing. Figure 1 displays the coating layers used in spheric TRISO-coated particle fuel.

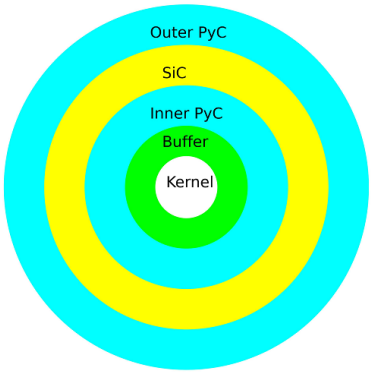


Figure 1. TRISO layers, kernel, Buffer, inner PyC, SiC, Outer PyC.

The Advanced Gas Reactor Fuel Development and Qualification (AGR) program qualifies TRISO fuels until 2026 (Morris et al., 2018). The AGR plan shows the following phases: AGR-1, AGR-2, AGR-3/4, and scheduled for 2022–2026, phase AGR-5/6/7. Table 4 depicts the TRISO fuel properties of the pebble, kernel, and carbon layers.

TISO fuel factors	PB-FHR	HFR-P4	R2-K12	AGR-2
Fuel kernel diameter (μm)	400	497	494	426.7
Fuel Kernel density (g/cm^3)	10.5	10.81	10.12	10.966
Fuel kernel composition (μm)	$UC_{1.5}O_{0.5}$	UO_2	$(Th\text{-}U)O_2$	UCO
Enrichment U-235 (%)	19.90	9.82	89.57	14.02
Buffer layer thickness (μm)	100	93	85	98.9
PyC inner layer thickness (μm)	35	37	39	40.4
SiC layer thickness (μm)	35	51	37	35.2
PyC outer layer thickness (μm)	35	38	39	43.4

Table 4. TRISO coated fuel used in Mark-1 compared with AGR plan and German of the1990s.

RESULTS AND DISCUSSION

Combinations of fluoride salts exhibit both beneficial and harmful traits. The two crucial chemicals are lithium fluoride and beryllium fluoride. There are two isotopes of lithium: Li-6 and Li-7. However, Li-6 has an expressive thermal neutron cross-section. FLiBe has a low neutron absorption cross-section, and the beryllium content is chemically toxic. (Sohal et al., 2010). The lithium of FliBe must be enriched to the ^{7}Li isotope at 99.9%.

Core heat transport calculation requires dominance of its properties, including density, heat capacity, viscosity, thermal conductivity, and vapor pressure. Besides, fluoride coolants benefit from being immune to the effects of volatile fission products generated by liquid or solid fuels. The primary circuit of the thermal reactor used in the initial studies requires graphite as a moderator. Since $^7LiF\text{-}BeF_2$ delivers heat in a power cycle between 600 °C and 700 °C, its melting and boiling points are 459 °C and 1430 °C, respectively. Salt

temperatures must be kept at a minimum of 550 °C to reduce the risk of freezing and at a maximum of 700 °C due to the material limitations of heat exchangers. It is not excessively high relative to the melting point at atmospheric pressure. Gas bubble release reduces fluoride salt densities in the temperature range of 670 °C to 750 °C (Gehin et al., 2016). Appropriated molten salts for FHRs show properties with good similarity. Figure 2 displays the density of liquid molten fluoride salts used as coolants and liquid fuels.

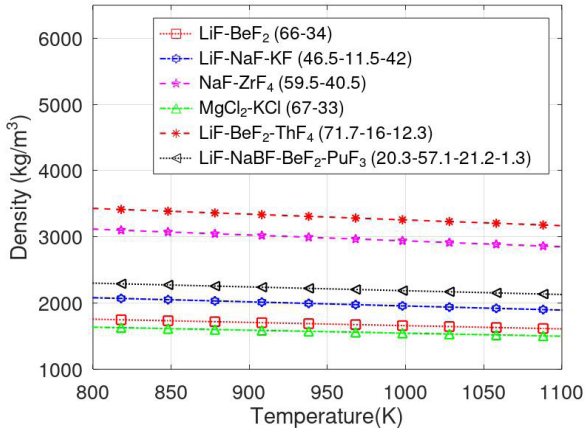


Figure 2. The density of liquid molten fluoride salts.

Following the formulation, ^{7}LiF-BeF$_2$ (66–34 mol%) has a sustained, temperature-independent liquid-state thermal conductivity of about 1.1 W/m·K. The thermal conductivity, on the other hand, declines and somewhat rises with temperature. The thermal conductivity of FliBe is slightly higher than that of FLiNaK, around 20%. Moreover, FLiNaK has a higher specific heat capacity than FliBe. Liquid metals, such as sodium and lead, show a little viscosity compared to molten fluoride salts. Figure 3 shows the dynamic viscosity of molten salts and dissolved fuels.

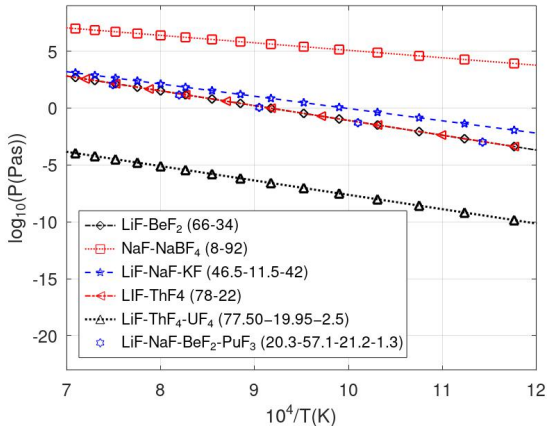


Figure 3. Dynamic viscosity of molten salts and dissolved fuels.

Since the 1950s, forced convective heat transfer experiments have initially focused on the ternary fluoride salt FLiNaK. To find the heat transfer coefficient, employ the Dittus-Boelter (DB) correlation with an accuracy of 15%. However, experiments for molten salts used an electrically heated Inconel tube with a Reynolds number of 2000 to 20000. The molten salts FLIBE and FLiNaK exhibit several notable thermodynamic properties, including low pressure and high heat capacity, a high boiling point, satisfactory viscosity, and a suitable Prandtl number.

There is good agreement with the Sieder-Tate correlation found for LiF–BeF_2–ThF_2–UF_4 and $NaBF_4$–NaF in the turbulent region at Reynolds above 15000. Figure 4 depicts the Prandtl number in the temperature function used to calculate the convection heat transfer coefficient.

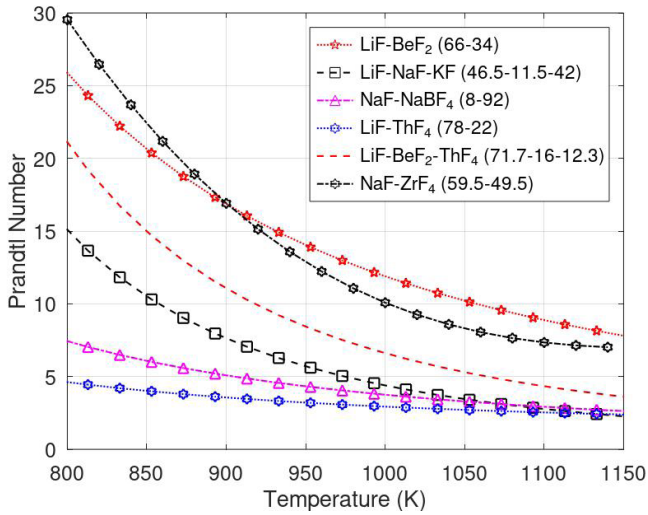


Figure 4. Prandtl number as a function of temperature at near atmospheric pressure

For many other designs, such as LWRs, micro-reactors, nuclear thermal propulsion, and salt-cooled reactors, the option TRISO is possible. TRISO kernels have included thorium carbide (ThC_2), thorium dioxide (ThO_2), plutonium dioxide (PuO_2), uranium dioxide (UO_2), and uranium oxycarbide (UCO), with diameters ranging from 100 μm to 500 μm and an enrichment of 19.74% U-235. TRISO fuels are structurally more resistant to extreme temperatures, corrosion, oxidation, and neutron irradiation than standard fuels, improving their fuel performance. Figure 5 shows the thermal conductivity of TRISO-coated layers.

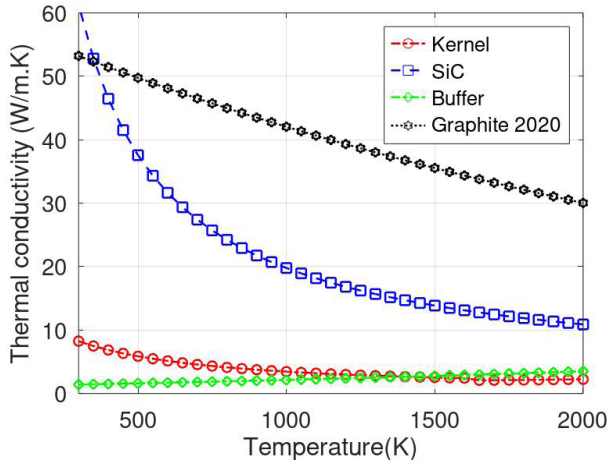


Figure 5. Temperature dependence of thermal conductivity for TRISO coatings.

TRISO fuels are structurally more resistant to extreme temperatures, corrosion, oxidation, and neutron irradiation than traditional reactor fuels, which impact fuel performance most. The buffer layer has a low density with a thickness of about 100 μm, producing a reservoir for fission gases such as Xe and Kr. Also, it must attenuate fission recoils and accommodate kernel swelling. The Mark-1 uses fuel pebbles with a diameter of 3.0 cm, which allows for more effective heat transmission thanks to salt cooling than helium cooling. Uranium oxicarbide (UCO) is a mixture of UO_2 and UC_2 in high-temperature gas reactors. Kernels containing UCO perform better than UO_2 and have a high safety margin. UCO creates CO through reactions between the carbon buffer and the extra oxygen released during fission. In contrast, the mixture of (UO_2-UC-UC_2) has multiple phases, which could reduce the internal gas pressure that causes TRISO failure.

The UCO kernel manufacturing route adopts the internal gelation process. Summarily, it combines internal gelation with carbothermal reduction. Phases comprise preparing the uranium solution, forming gelled microspheres, and sintering. There are differences in heat capacities between the pyrocarbon layers of TRISO fuels. Figure 6 depicts the heat capacities of TRISO coating layers. Figure 7 illustrates the thermal expansion coefficient of TRISO coating layers.

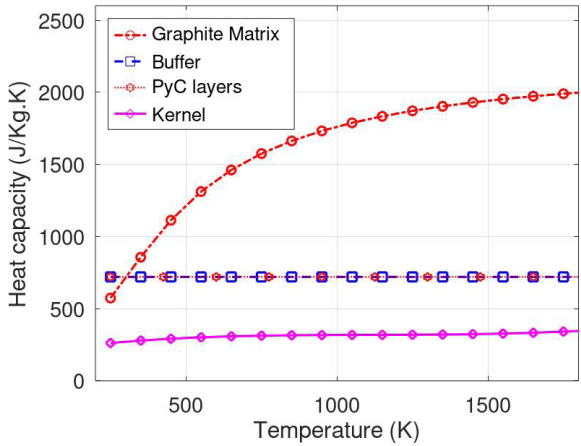


Figure 6. Heat capacity in function of the temperature of TRISO layers

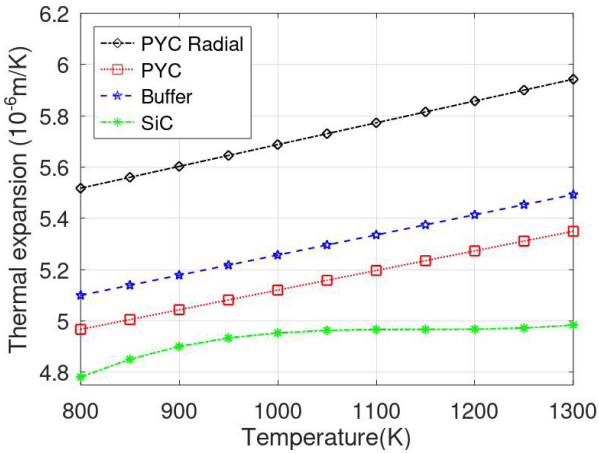


Figure 7. Thermal expansion coefficients of TRISO coatings.

Heat removal system of FHRs

A primary method of keeping nuclear reactors safe is using reliable methods to remove the decay heat. Thus, the FHR-safe system inherits three systems from other reactor designs, including decay heat removal. The first is the Direct Reactor Air Cooling System (DRACS) (Liu et al., 2018). In contrast, the Reactor Vessel Air Cooling System (RVACS) uses the natural air circulation through the reactor vessel to degrade heat, The third option is the silo cooling system (SCS) used for the decay heat removal system in a beyond-design accident. These tree heat removal systems aggregate sufficient capability to avoid catastrophic accidents.

Performance evaluation of decay heat removal systems for FHR resulted in three complementary concepts: DRACS, RVACS, and SCS. These systems are all built on technology initially created for other types of reactors. However, sodium shows a lower heat capacity of 1.25 J/kgK at 673 K than FliBe, with 2369 J/kgK. However, FliBe has a high volumetric heat capacity that forces mechanical adaptations, including the size of the heat exchangers, internal piping, valves, and internal components.

The DRACS has three coupled loops operating through natural circulation and convection. The DRACS Heat Exchanger (DHX) and the Natural Draft Heat Exchanger (NDHX) are the two heat exchangers that connect these loops. The fluidic diode reduces parasitic flow into the DRACS primary loop. Under accident scenarios, the DRACS is prepared for activation. DRACS transfers heat to a thermosiphon-cooled or natural heat exchanger that rejects heat from ambient air, which serves as the ultimate decay heat sink. Figure 8 depicts the half-PB-FHR Mark-1 core design, operating with a DRACS heat exchanger and fluid diode.

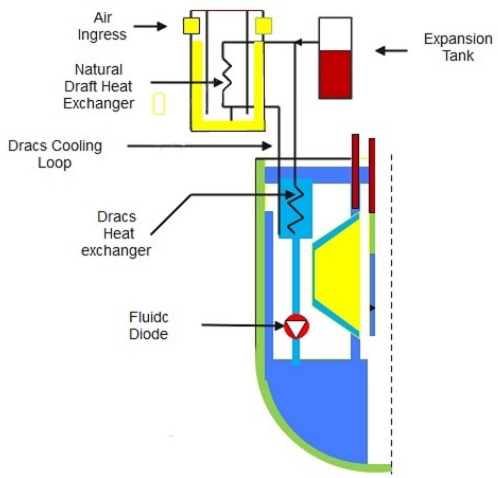


Figure 8. The Direct Reactor Auxiliary Cooling System is a passive heat removal system in FHRs.

The thermal conductivity value of 1.0 W/mK used for FLiBe heat capacity is 2390 J/kgK. While for the FLINaK, it is 0.92 W/m·K and 1940 J/kg·K. The packing factor adopted for FHR Mark-1 is 0.60, and the coolant velocity is around two m/s for both options, FLiBe and FLiNaK. Equations (1), (2), and (3) depict FLiBe properties given as a temperature function in K.

$$\rho_{FLiBe} = 2413.27 + 0.048T \quad (1)$$

$$\mu_{FLiBe} = 4638 \times 10^5 / T^{2.79} \quad (2)$$

$$k_{FLiBe} = 0.7662 + 0.0005T \quad (3)$$

where μ is the dynamic viscosity in kg/ms, ρ is the density in kg/m^3, and T is the temperature in K.

In FHR, the core average Reynolds number is over 1250, and the core average Prandtl number is 18.42. The average effective thermal conductivity of a TRISO sphere is around 15 W/mK. They composed spheres of TRISO fuel with a spherical fuel kernel and four coating layers: a porous carbon buffer layer, an IPyC layer, a SiC layer, and an OPyC layer. Mark 1's core contains around 470,000 fueled pebbles and 218,000 unfueled pebbles. One pebble produces 500 watts. Each pebble contains 1.5 g of uranium enriched at 19.9%, showing an external area of 0.00282 m^2 with an estimated core heat flux of 0.189 MWth/m^2. Equations (4), (5), (6), and (7) depict how it can calculate the convection heat transfer of the FHR core.

$$Nu = Pr^{1/3}\,[\,(1.18\,Re^{0.58})^4 + (0.23\,Re^{0.75})^4]^{0.25} \tag{4}$$

$$Re = \rho V_s d_{pebble}/\mu P_f \tag{5}$$

$$\mathrm{Pr} = \mu \mathrm{Cp}/\mathrm{k} \tag{6}$$

$$h = kNu/d_{pebble} \tag{7}$$

where μ is the dynamic viscosity in (Pas), Pf is the packing factor of 0.6, Vs is the coolant velocity in m/s, Pr is the Prandtl number, Re is the Reynolds number, and k is thermal conductivity (W/mk).

The active volume of fuel is 10.4 m^3, with a power density of 22.7 MWth/m^3, resulting in 236 MWth. The nominal coolant flow rate in the Mk1 design is 0.54 m^3/s, which uses approximately 47 m^3 (91,970 kg) of FliBe as its main salt. Many pebble bed codes are used to calculate the coolant temperature throughout the reactor and the fuel temperature, using the coolant temperature as a boundary condition. The fuel performance code PARFUME calculates the mechanical response of the pebble-bed spherical fuels under irradiation. Figure 9 shows the convection heat transfer of PB-FHR using FliBe compared with FLiNaK.

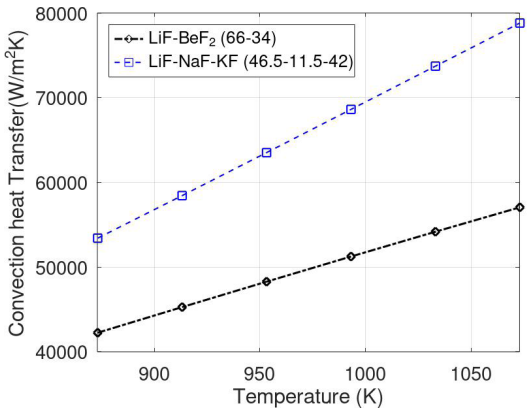


Figure 9. Convection heat transfer for FliBe and FLiNaK

CONCLUSION

One of the main advantages of nuclear liquid fuels based on molten salts is that they may provide online processing of fission products. The technique most commonly employed for removing fission products is reductive extraction, which removes uranium fuel before the fission products. Using molten salts in high-temperature reactors operating near atmospheric pressures is advantageous over helium-gas-cooled reactors. The features of the molten salt FliBe include its low melting point of 459 °C, high boiling point, and thermal conductivity of 1.1 W/mK. In addition, it shows a low vapor pressure of 1.2 mmHg at 900 °C and a high specific heat capacity of 2390 J/kgK, supporting the use of this material. Fluoride molten salt showed a high Prandtl number of 10 to 20. This way, FliBe, FLiNaK, and NaF-ZrF_4 coolants meet better specifications. The high density of these salts in the liquid state and their high volumetric capacity are positive factors, enabling more compact nuclei. They use encapsulated, coated particles in TRISO fuel with a power of 500 W per sphere of 3 cm diameter. The FHR Mark-1's operating parameters in the thermal spectrum are between 600 °C and 700 °C. The expertise accumulated over the years in Germany for helium-cooled reactors with a diameter of 6 cm and spherical fuels has made substantial progress. NACC cycles use a GE7 gas turbine to improve the thermal efficiency of FHRs to 66%.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author expresses profound appreciation to the Energy and Nuclear Research Institute and the National Nuclear Energy Commission (IPEN/CNEN-SP) for their technological help in making the study presented here possible.

RESPONSIBILITY NOTICE

The author ensures that all responsibility for scientific information here is shown.

REFERENCES

Blandford, E., Brumback, K., Fick, L., Gerardi, C., Haugh, B., Hillstrom, E., and Zweibaum, N.,2020. Kairos power thermal hydraulics research and development. Nuclear Engineering and Design, vol. 364, pp. 110636.

Carrara, S., 2020. Reactor ageing and phase-out policies: global and regional prospects for nuclear power generation. Energy Policy, Vol. 147, pp.111834.

Cousse, J., 2021. Still in love with solar energy? Installation size, affect, and the social acceptance of renewable energy technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 145, pp. 111107.

Elder, R., and Allen, R., 2009. Nuclear heat for hydrogen production: Coupling a very high/high-temperature reactor to a hydrogen production plant. Progress in Nuclear Energy, Vol. 51(3), pp. 500–52.

Fernández-Arias, P., Vergara, D., and Orosa, J. A., 2020. A global review of PWR nuclear power plants. Applied Sciences, vol. 10(13), pp. 4434.

Forsberg, C., Wang, D., Shwageraus, E., Mays, B., Parks, G., Coyle, C., and Liu, M., 2019. Fluoride-salt-cooled high-temperature reactor (FHR) using British advanced gas-cooled reactor (AGR) refueling technology and decay heat removal systems that prevent salt freezing.

Haubenreich, Paul N., and J. R. Engel., 1970. Experience with the molten-salt reactor experiment. Nuclear Applications and Technology vol 8.2, pp: 118–136.

Helmreich, G. W., Kercher, A. K., Gerczak, T. J., Richardson, D., Montgomery, F. C., Skitt, D. J., and Hunn, J. D., 2022. Microstructure of irradiated AGR TRISO particle buffer layers as measured by X-ray computed tomography. Journal of Nuclear Materials, vol. 572, pp. 154061

Ho, M., Obbard, E., Burr, P. A., and Yeoh, G., 2019. A review on the development of nuclear power reactors. Energy Procedia, vol. 160, pp. 459–466.

Krey, V., Luderer, G., Clarke, L., and Kriegler, E., 2014. Getting from here to there–energy technology transformation pathways in the EMF27 scenarios. Climatic change, vol. 123, pp. 369-382.

Li, X., Zhang, D., Yun, S., Zhou, X., Jiang, D., Lv, X., and Liu, X., 2023. Design and optimal thermal efficiency contrastive analysis on closed Brayton cycle systems with different fluids of fluoride-salt-cooled high-temperature advanced reactor. Applied Thermal Engineering, vol. 226, pp. 120291.

Liu, M., Hughes, J., Ali, A., and Blandford, E., 2018. Conceptual design of a freeze-tolerant Direct Reactor Auxiliary Cooling System for Fluoride-salt-cooled High-temperature Reactors. Nuclear Engineering and Design, vol. 335, pp. 54–70.

MacPherson, H. G. 1985. The molten salt reactor adventure. Nuclear Science and Engineering, vol. 90.4, pp: 374–380.

Morris, R. N., Hunn, J. D., Baldwin, C. A., Montgomery, F. C., Gerczak, T. J., and Demkowicz, P. A., 2018. Initial results from safety testing of US AGR-2 irradiation test fuel. Nuclear Engineering and Design, vol. 329, pp. 124–133.

Novak, A. J., Schunert, S., Carlsen, R. W., Balestra, P., Slaybaugh, R. N., and Martineau, R. C., 2021. Multiscale thermal-hydraulic modeling of the pebble-bed fluoride-salt-cooled high-temperature reactor. Annals of Nuclear Energy, vol. 154, pp. 107968.

Pioro, I. L., Duffey, R. B., Kirillov, P. L., Fialko, N. M., and Pioro, R. M., 2023. *Current status and future trends in the world nuclear-power industry. Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*, pp. 85–108.

Qu, X., Yang, X., and Wang, J., 2022. Characteristics Analysis of Combined Cycle Coupled with High-Temperature Gas-Cooled Reactor Based on Progressive Optimization. Frontiers in Energy Research, vol. 9, pp. 1011.

Reitsma, F., Strydom, G., De Haas, J. B. M., Ivanov, K., Tyobeka, B., Mphahlele, R., Sikik, U. E., 2006. The PBMR steady-state and coupled kinetics core thermal-hydraulics benchmark test problems. Nuclear Engineering and Design, vol. 236(5-6), pp. 657–668.

Satvat, N., Sarikurt, F., Johnson, K., Kolaja, I., Fratoni, M., Haugh, B., and Blandford, E., 2021. Neutronics, thermal-hydraulics, and multi-physics benchmark models for a generic pebble-bed fluoride-salt-cooled high-temperature reactor (FHR). Nuclear Engineering and Design, vol. 384, pp. 111461.

Scarlat, R. O., Laufer, M. R., Blandford, E. D., Zweibaum, N., Krumwiede, D. L., Cisneros, A. T., and Peterson, P. F., 2014. Design, and licensing strategies for the fluoride-salt-cooled, high-temperature reactor (FHR) technology. Progress in Nuclear Energy, vol. 77, pp. 406–420.

Schulenberg, T., 2022. Molten Salt Reactors. In The fourth generation of nuclear reactors: Fundamentals, Types, and Benefits Explained (pp. 147–165). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Seifried, J. E., Scarlat, R. O., Peterson, P. F., and Greenspan, E., 2019. A general approach for determination of acceptable FLiBe impurity concentrations in Fluoride-Salt Cooled High-Temperature Reactors (FHRs). Nuclear Engineering and Design, vol. 343, pp. 85–95.

Serp, J., Allibert, M., Beneš, O., Delpech, S., Feynberg, O., Ghetta, V., and Zhimin, D., 2014. The molten salt reactor (MSR) in generation IV: overview and perspectives. Progress in Nuclear Energy, vol. 77, pp. 308–319.

Singh, V., Wheeler, A. M., Lish, M. R., Chvala, O., and Upadhyaya, B. R., 2018. Nonlinear dynamic model of Molten-Salt Reactor Experiment, Validation, and operational analysis. Annals of Nuclear Energy, vol. 113, pp. 177–193.

Stack, D. C., Curtis, D., and Forsberg, C., 2019. Performance of firebrick resistance-heated energy storage for industrial heat applications and round-trip electricity storage. Applied Energy, vol. 242, pp. 782–796.

Suh, R., Martinson, S., Boldon, L., Breshears, A., and Therios, I., 2022. “Safeguards Considerations for Coated Particle Fuel Fabrication Facilities” (No. ANL/SSS-21/8), Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States).

Vitart, X., Le Duigou, A., and Carles, P., 2006. Hydrogen production using the sulfur iodine cycle coupled to a VHTR: an overview. Energy conversion and management, vol. 47(17), pp. 2740–2747.

Wang, Q., Liu, C., Luo, R., Li, X., Li, D., and Macian-Juan, R., 2021. Thermo-economic analysis and optimization of the very high temperature gas-cooled reactor-based nuclear hydrogen production system using copper-chlorine cycle. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 46(62), pp. 31563–31585.

Xu et al., 2019. Characterization of molten $^{7}LiF\text{-}BeF_2$ salt impregnated into graphite matrix of fuel elements for thorium molten salt reactor. Nuclear Science and Techniques, vol 30(5). pp. 74.

Zohuri, B., 2020. *Generation IV nuclear reactors. In Nuclear Reactor Technology Development and Utilization*, Woodhead Publishing.

EVOLUTION OF DISPERSED FUEL USED FOR RESEARCH AND TEST REACTORS

Data de aceite: 01/04/2024

D. S. Gomes
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP)
São Paulo, SP

ABSTRACT: Currently, 222 research reactors are operating in 53 countries in Brazil, four units. Nuclear fuel type used in research reactors depends on the thermal power level, classified by power classes, such as critical and subcritical units operating below 1Kw, working from 1 kW to 1 MW, and over 1 Mw, being 28 facilities operating on a medium power spectrum from 1 MW up to 10Mw. Alternatively, they divided the research reactor into low-enriched uranium below 20% of U-235 and highly-enriched uranium over this limit. In the 1950s, the superheat section of the Fifth Boiling Reactor Experiment (BORAX-V) used enriched uranium (93 wt.% U-235) as uranium dioxide in a matrix of stainless steel. In sequence, it divided a fast dispersion fuel evolution into three ages. The 1950s predominated U–Al alloy. In the 1960s, the U_3O_8–Al and UAl_x-Al followed the 1980s, focusing on high uranium density up to 4.8 gU/cm^3 planned to U_3Si_2-Al and U10Mo/Al. Today, global research focuses on U-10Mo dispersion and monolithic forms. Many thermal physical features of dispersed fuels can help define the application field, mainly focused on neutron activation analysis and radiopharmaceutical production.

KEYWORDS: Research reactors, monolithic fuel, U_3O_8/Al, U_3Si_2/Al, U-10Mo/Al.

INTRODUCTION

Nuclear fuels are materials capable of producing energy through a self-sustaining process of nuclear fission. They contain fertile materials such as U-235 or Pu-239, shown in many shapes as solid and liquid forms. The Research and material test reactors have employed dispersion fuel plates manufactured using an aluminum matrix. The fuel plates in which it dispersed the fissile material in powder form within an aluminum matrix to form a fuel core cladded between two aluminum alloy sheets [1].

Early experiments used aluminum in the function of the superior features, such as low cost, accessible manufacturing, a low abortion cross-section, higher corrosion resistance, and excellent mechanical response. Fuel technology used for the research reactors has adopted dispersion using Al or Zr as a metallic matrix and fissile compounds based on ceramic fuels (e.g., uranium dioxide, carbides, and nitrides) [2].

Summarily, the timeline of dispersion fuel shows at least three phases. In 1950, Starting from the U-Al fuel system, increasing the volume of UAlx in the fuel plates had its limits, UAl-Alx dispersion fuel, with uranium densities increase of 30% to 50% compared with U-Al alloys in 1960 [3]. In 1980, the U_3Si_2-Al (77 wt.% U_3Si_2) for low-temperature applications showed a higher uranium density of 4.8 g.cm^{-3}, and U_3Si for high-temperature applications. In 1992, occur an increase in U_3Si_2 density of 12.2 g. cm^{-3} [4-5]. The current phase has developed a U-Mo monolithic form with densities of 17 g.cm^{-3}. At the turn of the millennium began European plans, such as FUTURE and Surface Engineering of Low ENrIched Uranium–Molybdenum (SELENIUM) to irradiations of disperse low enrichment uranium (LEU) (19.7% 235U) based U-7w%Mo, with 8gU.cm^{-3}, finished in 2015 [6]. In this period, American partners concentrated on developing monolithic UMo while Europe focused on dispersed solutions.

Highly enriched uranium (HEU) fuels with (over 20% 235U) were used worldwide in research reactors for isotope production. However, in 1978, a new horizon to avoid the proliferation risk occurred with the Reduced Enrichment for Research and Test Reactor (RERTR), supported by the US Department of Energy (DOE). In the 1980 decade, the RERTR program reduced the usage of HEU fuels.

Aluminide fuels (UAlx-Al) with a density range of 0.4-0.8 gU.cm^{-3} and peak densities of 1.7 gU.cm^{-3}. Since 1990, metallic UMo alloy fuels have been one of the adequate fuels for converting HEU to the more proliferation-resistant LEU.

The U_3Si_2-Al is recognized as one of the best options, with high uranium loading and enrichment below 20% [7]. After the Fukushima accident in 2011, there has been a renewed interest in higher fissile density fuels, such as UN. and U_3Si_2, for light water reactors mainly due to their proven high thermal conductivity [8]. On the other hand, has been tested many uranium alloys, such as U_6Fe, U_6Mn, and many more combinations.

The code of federal regulation emitted the 10 CFR 50.64 limited the use of HEU fuels for American research reactors in 1986 [9]. However, there are still a few HEU reactors in operation. The University of Missouri Research Reactor (MURR), operating at 10 megawatts using an enrichment of 93%, is the university's most powerful research reactor. The NBSR is heavy water moderated and cooled, financed by the National Institute of Standards and Technology (NIST) work with fuel dispersion and enrichment of 93%.

This study focuses on dispersion fuel used in research and test reactors, showing the multiple options, such as ceramic dispersed and ceramic-metal dispersed in the aluminum matrix and metallic fuel. The main objective comprises permitting complementary concepts of dispersion and monolithic fuel, showing the art state of the fuel plate technology.

MATERIALS AND METHODS

Over the years, research reactors have used fuel plates manufactured of uranium fissile particles dissolved in an inert aluminum matrix. The plates in these reactors consist of a fuel core, or “meat,” in an aluminum alloy cladding. Formerly, cast and wrought alloys of uranium and aluminum, consisting of UAl_3 and UAl_4 precipitates in an aluminum matrix, were used for the fuel meat. Thus, it is essential to understand uranium behavior.

Properties of dispersion fuels

Uranium has three allotropic forms: solid from 25 °C to 1132 °C and liquid phase. In the solid state, uranium shows three phases orthorhombic, tetragonal, and gamma. The orthorhombic α-uranium phase had four atoms per unit cell, stable from room temperature to < 667 °C. Phase transformation α-β occurs at 667 °C with a volume increase (ΔV/V) of 1.06.

The uranium structure shows a tetragonal-beta phase, stable from 667 °C to 775 °C, revealing 30 atoms per unit cell. In the second phase transition, β-γ at 775 °C appoint to volume decreasing (ΔV/V) of 0.736 because of Body-centered cubic (BCC) present in the gamma-phase is stable between 775 °C to 1132 °C or melting point. Ideally, the UAlx comprises a combination of UAl_2, UAl_3, UAl_4, and other Aluminum phases. Table I shows a simple comparison of some physical properties of intermetallic and ceramic fuels.

Physical properties	UAl_x	UAl_2	UAl_3	UAl_4	U_3Si_2	U_3O_8	U-7Mo	U-10Mo
Melting point (°C)	NA	1590	1350	730	1665	1150	1145	1150
Density ($g.cm^{-3}$)	6.4	8.1	6.8	6.0	12.2	8.3	18.4	18.2
U densities ($gU.cm^{-3}$)	4.5	6.6	5.1	4.1	11.3	7.0	17.1	16.4

Table I. Comparison of intermetallic fuels UAlx, U-xMO with the ceramics U3O8 and U3Si2

Tracing an evolutionary timeline of dispersion technology found four periods. During 1950, predominate U-Al alloy materials, followed by UAl/Al_x dispersion fuel, with uranium densities increase of 30% to 50% compared with U-Al alloys in 1960.. Figure 1 shows the thermal conductivity of uranium, U7Mo, and U10Mo.

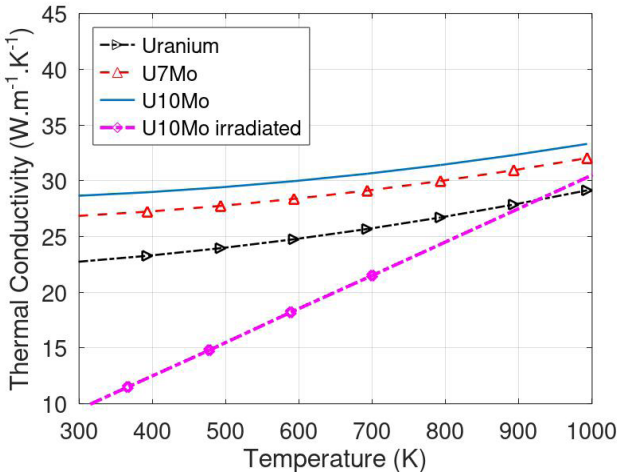


Figure 1: Thermal conductivity of uranium and versus temperature

During 1980, the silicide dispersion U3Si2/Al was typically 7.5 wt% Si, with densities superior to U-Al. In 1990, UMo/Al started, followed by monolithic fuels. Early experiments used aluminum for its superior features, such as low cost, accessible manufacturing, a low abortion cross-section around 0.22 barn, higher corrosion resistance, and excellent mechanical response. Over the years, the research reactors adopted uranium intermetallic fuels, such as U–Al, U–Si, and U–Mo, which provided an easy solution for neutron sources and material tests. Uranium metallic has a higher density of 18.1 $g.cm^{-3}$ and thermal conductivity of 35 $W.m^{-1}.K^{-1}$. The fuel element is formed by assembling a series of spaced fuel plates, allowing the light water flow that serves as a coolant and moderator. Figure 2 displays some thermal conductivity of commons materials used in dispersions.

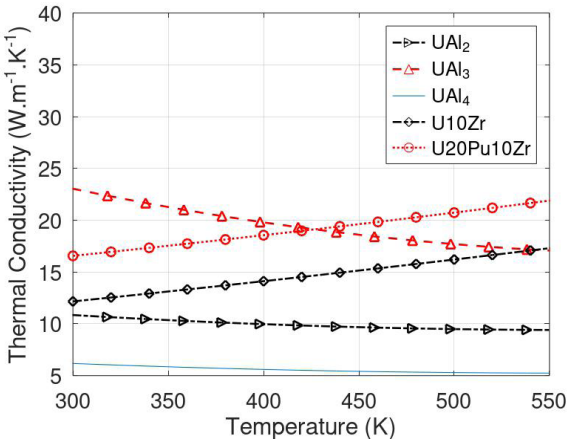


Figure 2: Thermal conductivity of metallic fuels

Physical properties	U	U_3Si_2	U-10Mo	U-6Zr-2Nb	U-7Nb
Density (Ug cm^{-3})	19	18.1	16.06	12.92	15.0
Melting point (°C)	1132	1665	1160	1160	1499
Thermal conductivity ($W.m^{-1}.°C^{-1}$)	27	8.5	11.3	11.4	21.1

Table II. Fissile materials to produce aluminum dispersion fuel for thermal and fast reactors.

Over time, many applications of aluminum dispersion at high temperatures reveal a higher potential for self-propagation of aluminothermic reactions under irradiation. Besides, U-Al dispersion showed good thermal conductivity comparable to metal alloys and excellent corrosion resistance. Also, it shows suitable mechanical strength at high temperatures and easy fabrication. An essential drawback of the U-Al_x dispersion is a low uranium content, of 1.7 $gU.cm^{-3}$, in the fuel meat found (37 vol% of UAl). Besides, the swelling is an unwanted result of the chemical reaction between uranium and aluminum intermetallic compounds produced, so-called aluminides. Table III shows the properties of uranium-aluminide compounds contained in the fuel plates.

Compound	UAl_2	UAl_3	UAl_4
Melting Point (°C)	1619.85	1349.85	730.85
Enthalpy of formation ($kJ.mol^{-1}$)	-92.27	-104,60	-129,99
Theoretical density ($g.cm^{-3}$)	8.14	6.8	6.06 - 5.7
Uranium density ($gU.cm^{-3}$)	6.64	5.08	4.16
Uranium content (wt.%)	81.3	74.4	68.5 - 64
Formation energy ΔE ($kJ.mol^{-1}$)	6.8	-9.3	-3.8
Lattice volume ($Å^3$)	115.630	77.285	187.285
Crystal system	FCC	Cubic	Orthorhombic

Table III. Physical properties of uranium-aluminide compounds contained in the fuel plates.

In the 1960s, the Oak Ridge National Laboratory (ORNL) and Argonne National Laboratory (ANL) developed the manufacturing route of the U3O8 powder by oxidation of uranium metal in air oxygen. The U3O8-Al dispersion fabrication process combines powder metallurgy hot roll bonding procedure, which may generate swells or blisters if heated above 600 °C. Early, U3O8-Al dispersion fuel made it possible to increase between 30% to 50% the volume fraction of fissile material. Before 1978, the U3O8-Al dispersion fuel produced contained a ceramic compound with a density of 1.3 gU.cm-3 in fuel meat 18 vol% of U_3O_8. The Experimental programs qualified some lower-density fuel dispersion, including UAl_x-A1 with a uranium density of 2.3 $g.cm^{-3}$ and U_3O_8-Al for densities up to 3.2 $gU.cm^{-3}$. The UZrHx shows uranium loading for up to 3.7 $gU.cm^{-3}$ and U_3Si_2-A1 for up to 4.8 $g.cm^{-3}$.

Though aluminum dispersion has many advantages, many remaining subjects need a deep study, such as the interaction layer formed between uranium and aluminum for metallic fuels U-Mo and ceramic U_3Si_2/Al generating $(UAlSi)_3$ phase. Moreover, the current

phase has developed a U-Mo monolithic form with densities of 17 $g.cm^{-3}$. During the evolution of intermetallic fuels, many tests were performed using U_6Fe, U_6Mn, U-MO, and much more combinations.

Developing low-enriched fuels to replace high-enriched fuels used for high-flux reactors requires increased uranium density to offset the enrichment decrease. U-Mo/Al dispersion fuel with uranium loadings of up to 8$g.cm^{-3}$ under irradiation increased coarse porosity between the matrix and the interaction phase when the fuel-Al interaction consumed a significant part of the Al-matrix. Besides, the meat porosity depends on a metallurgic powder route, which can reduce with atomized powder from 12% to 1.2%.

The oxidation of the cladding is a barrier to the thermal flux transport because of the low thermal conductivity of the boehmite of 2.25 $W.m^{-1}$ C^{-1} than Al-6061 alloy of 160 $W.m^{1}.C^{-1}$. This way, the U_3Si_2/Al submitted at high heat flux over 550 $W.cm^{-2}$ produces a dense oxide layer developed, followed by a layer with a granular aspect, most probably caused by pitting corrosion.

Brazilian research reactors

In this context, In Brazil, there are four research reactors in operation: the IEA-R1 and the MB-01 reactors, both at the Nuclear Energy Research Institute (IPEN, São Paulo); the Argonauta, at the Nuclear Institute of Nuclear Engineering (IEN, Rio de Janeiro) and the IPR-R1 reactor, at the Nuclear Technology Development Center (CDTN, Belo Horizonte). The IEA-R1 is in operation supported by IPEN, with its first criticality in 1957. It has a thermal neutron flux of 4.6×10^{13} $n.cm^{-2}.s^{-1}$ and a fast flux of 1.3×10^{14} $n.cm^{-2}.s^{-1}$ under a steady state.

IEA-R1 operates ceramic fuel-dispersed U_3O_8-Al with demineralized water serving as coolant and moderator at the velocity of 0.8 $m.s^{-1}$ and uses beryllium and graphite as reflectors. In 1997, the IEA-R1 got an operating license for 5 MW. In 1998, the IPEN started producing and qualifying its own U_3O_8/Al, with a density of 2.3 $g.cm^{-3}$. Since 2007, the IPEN has expanded into manufacturing fuel plates using uranium silicide U_3Si_2/Al, with a density of 3.0 $g.cm^{-3}$. Training, Research, Isotopes, General Atomics (TRIGA) IPR-R1 reactor, acquired in 1960 by current CDTN, was the second research reactor installed in Brazil, with the first criticality notified in 1960.

TRIGA IPR-R1 reactor, acquired in 1960 by current CDTN, was the second research reactor installed in Brazil, with the first criticality notified in 1960. The timeline of IPR-R1 had various purposes, from iodine irradiation for health applications to the production of radioisotopes for industrial applications and tracers for environmental studies. In worldwide are 66 units installed in 24 countries, operating with metallic fuel, the uranium-zirconium hydride ($UZrH_x$).

Ceramic fuels and metallic fuels

Nuclear fuel technology widely uses ceramics as a superior option for a vast gamma of applications, mainly in light water reactors, providing about 10% of the global electricity demand with nearly 443 power reactors in operation. Ceramic oxides and metallic cladding comprise the most used fuel systems, completing over sixty years of experience. Ceramic oxides, such as UO_2, U_3Si_2, and mixed oxide fuel (MOX) $(U\text{-}Pu)O_2$ and $(Th\text{-}Pu)O_2$, using zirconium alloys as a coating, are preferable in thermal reactors. Besides, fast reactors do not use neutron moderators like water or graphite. The best nuclear option is plutonium or composed ceramics, such as nitrides (U-Pu)N or carbide (U-Pu)C.

The Ceramic-metallic (CERMET) fuels were research objects of the nuclear space propulsion program, which started in 1953 and ended in 1973. Cermet fuel comprises ceramic fuel particles uniformly dispersed in a metal matrix. The aerospace program GE700 developed cermet fuel, such as $W\text{-}UO_2$ and $Mo\text{-}UO_2$, from 1962 to 1968 in ANL, besides for a naval propulsion plan to qualify uranium nitride (UN) particles dispersed in a tungsten-molybdenum alloy matrix (W/Mo-UN). Nautilus was the first nuclear submarine, with a sea trial in 1955, operating with light water as a coolant and moderator. Table IV shows the thermal properties of ceramics dispersed into Al-matrix at 25 °C.

Physical Properties	UO_2	U_3O_8	U_3Si_2	$(U\text{-}20Pu)O_2$
Melting Point (°C)	2875	1150	1665	2750
Density ($g.cm^{-3}$)	10.06	8.4	12.2	11.07
Uranium density ($gU.cm^{-3}$)	9.7	7.1	11.3	9.77
Thermal conductivity ($W.m^{-1}°C^{-1}$)	8.68	6.0	10.2	7.82

Table IV. The thermal properties of ceramic fuels used in light water reactors.

This way, the Nautilus had a compact core work with highly enriched uranium, using plates of UO_2 dispersed in a zirconium matrix. However, the old option fuel planned for the naval reactor showed UO_2 dispersed in a metal matrix of zirconium or stainless steel. Figure 3 displays the linear thermal expansion coefficients of materials used in dispersions.

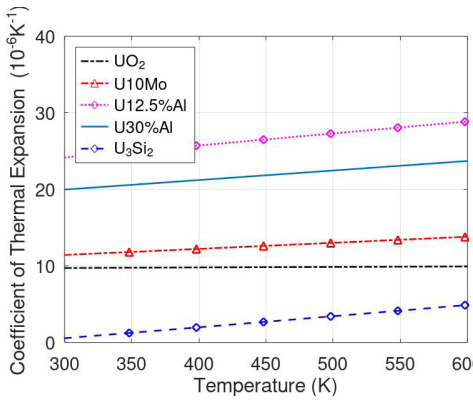


Figure 3: Linear thermal expansion of fuels used in dispersions.

Metal fuels are ideal for fast reactors, showing higher densities of fissile and fertile materials and providing higher core performance, such as a higher breeding ratio and less fissile inventory. The U-Zr hydride fuel with densities of 3.7 g/cm^{-3}, using aluminum or stainless steel as cladding, is the most used in training reactors (TRIGA). Thus, has arisen other alloys, such as U-Zr, U-Zr-Nb, and U–Pu–Zr alloys.

RESULTS AND DISCUSSION

The U-Al_x-Al dispersion's thermal conductivity depends on the uranium content weight fraction and porosity. Assuming an average porosity of the order of 7%, with 20 wt% of uranium, found a thermal conductivity is 160 W.m^{-1}.K^{-1} and decreases with uranium increase. When uranium content reaches 70 wt%, the thermal conductivity drop to 20 W.m^{-1}.K^{-1}.In part because the thermal conductivity of metallic uranium is reduced compared with Al-6061. The thermal conductivity of U_3Si-Al and U_3Si_2-Al dispersions also rely on fuel content and porosity. With 20 wt% of U_3Si_2, the thermal conductivity is 90 W.m^{-1}.K^{-1}. When it reaches 50 wt%, the thermal conductivity drop to 22 W.m^{-1}.K^{-1}. For U_3Si, the thermal conductivity at 20 wt% is 120 W.m^{-1}.K^{-1} and drops to small values at 50 wt%. For U_3Si and U_3Si_2, the porosity will increase with volume content that achieves a maximum of 50%. Table V displays some aluminum matrix properties.

Physical properties	Al-6062	Al-606-T4	Al-606-T6	Al-7075-T6
Temperature, solidus to liquidus (°C)	582 - 651	582 - 651	582 - 651	477 - 635
Thermal conductivity (Wm^{-1}.K^{-1})	189	154	167	173
Specific heat capacity (J.kg^{-1}.°C-^{1})	896	896	896	960
CTE (μm.m^{-1}.°C^{-1})	23.6	23.6	23.6	21.6
Ultimate tensile strength (MPa)	117	241	310	524
Yield tensile strength (MPa)	48.3	145	276	462
Elongation at break (%)	25%	22%	17	3%
Modulus of elasticity (GPa)	68.9	68.9	68.9	71.7
Shear modulus (MPa)	26	27	26	26.9
Poisson	0.33	0.33	0.33	0.33

Table V. Aluminum-matrix materials normally used for dispersions U3Si2/Al and U10Mo/Al

U_3Si_2 is a qualified fuel with high uranium loading and performance for research and test reactors. Also, U_3Si_2 fuel shows high resistance to driven gas swelling. Under the manufacturing route of U_3Si_2, it exhibited chemical reactions with Al-matrix to form some $U(SiAl)_3$ phases, U_3Si, and U_3Si_2. The composition and homogeneity of the alloy and heat treatment determine the quantity of each aluminide phase present. The two phases, U_3Si_2 and USi, can exist at equilibrium. This reaction between silicide intermetallic and aluminum matrix produces an interface layer that transforms crystalline into amorphous compounds

with lower thermal conductivity. Still, the critical temperature to occur amorphization is 290 °C. U_3Si_2 has advantages compared with U_3Si related to fission gas swelling: comparatively U_3Si forms giant bubbles, and U_3Si_2 tiny bubbles. Both U_3Si_2 and U_3Si have a thermal conductivity of ~15 $W.m^{-1}.°C^{-1}$. The average thermal expansion coefficients of U_3Si_2 and U_3Si over the range of 20°C to 600°C are 15.2 x 10^{-6} and 15.8 x10^{-6} per °C, respectively.

Fuels swelling

The swelling level is a function of the temperature, irradiation of fuel density, and concentration of the fissile uranium. Because of the fission of U^{235}, the swelling has two reasons: the solid fission products can induce crystal damage coupled with fission gas forming bubbles. Thus, it reduces the thermal conductivity of the fuel plate, producing a higher temperature gradient. Figure 4 shows the consequence of temperatures on total fuel swelling in fuel plates.

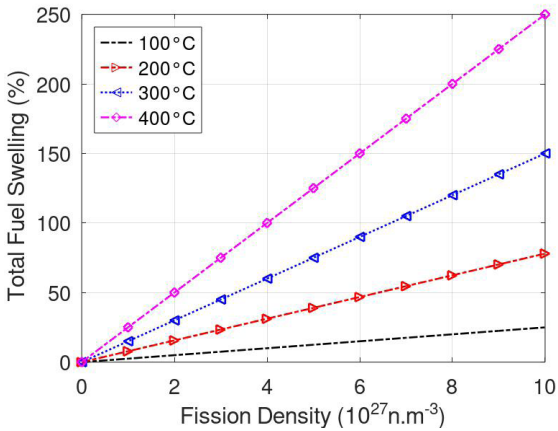


Figure 4: Fuel plate swelling versus irradiation temperature.

Then, the fission gas released speeds up the loss of the mechanical properties of the plate. The swelling curve exhibits a sharp knee that shifts to a higher fission density. The knee of the curve happens because of the rapid multiplication of the gas bubble, and the bubble size increases linearly. UMo surfaces. Equations (A) and (B) representing swelling rate given as function of fission and molybdenum content in weight for U_xMo.

$$\frac{\Delta V}{V} = 5.8336 \times 10^{-23}.(1.25 - 2.5w_{Mo}).f, \quad for\ f \leq 2.0 \times 10^{21} \tag{A}$$

$$\frac{\Delta V}{V} = (1.25 - 2.5w_{Mo}).[0.1667 + 1.1667 \times 10^{-22}.(f - 2.0 \times 10^{21})], for \geq 2.0 \times 10^{21} \tag{B}$$

where ΔV/V represents the fuel swelling for the U-Mo alloy, w_{Mo} is the weight fraction of Mo in the fuel alloy, and f represents the fission density (fissions.cm^{-3}).

In UMo/Al, swelling produces geometric deformations, which could fracture. The swelling is a function of fission densities; 3×10^{21} f/cm^{-3} has about 20% of swelling, while the fission rate of 7 $\times10^{21}$ f.cm^{-3} achieves 44%. Swelling deformation increases the stress on meat fuel, and it calculated the cladding matrix as a function of fission density. Figure 5: Uranium loading versus fission phase percents.

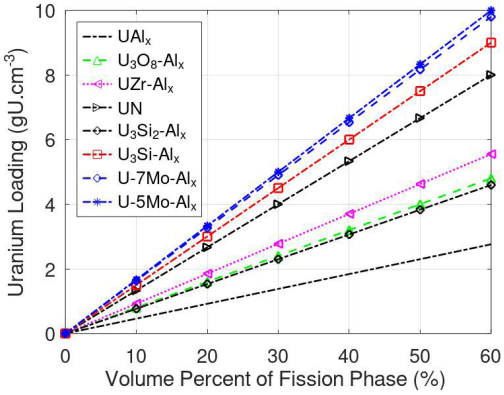


Figure 5: Uranium loading versus fission phase percents

Interdiffusion layer

Interaction layer (IL) growth between fuel particles and the matrix partially represents the plate fuel performance. The interaction layer growth data for U_3Si, U_3Si_2, and USi dispersions in the Al matrix show a few empirical correlations for silicides dispersion. The IL growth rates did not decrease with the decreasing U/Si ratio by fission, while the growth is a typical interdiffusion process between U, Si, and Al. Early irradiation studies showed that adding small amounts of silicon to the aluminum matrix drastically altered the composition of the (U-Mo-Al-Si) zone, reducing irradiation-induced growth. However, the thickness of the interaction layer grows more slowly than in UMo/Al dispersions.

The growth rate of the interface depends on temperature under irradiation. Besides, U_3Si_2/Al dispersions are free of porosity formation, in contrast to UMo/Al. Although U_3Si is unsuitable for a plate-type geometry because of unstable swelling, it is still applicable for fuel rods. Both U_3Si_2 and USi are brittle U_3Si is rigid and relatively soft.

The microstructure of U_3Si_2/Al dispersions fuel plates submitted to a high heat flux suffer unwanted changes. At severe conditions performed using a maximum heat flux of 520 W.cm^{-2}, leading to a cladding surface temperature of 180 - 200°C and fuel meat temperatures of 220 - 240°C. As a result, these experiments found degradations on the outer aluminum surfaces of the U_3Si_2 coupled with higher fission products released at maximum fuel burnup of 25% U-235. Equation (C) represents an empirical correlation for UxMo fuel given as a function of fission and fraction of molybdenum in weight.

$$y^2 = 2.2443 \times 10^{-19}.(1.625 - 6.25w_{Mo}).(f^{0.75}).\Delta t.exp\left\{\frac{-10000}{RT}\right\} \quad \text{(C)}$$

where y is the interaction thickness (cm), w_{Mo} is the weight fraction of Mo in the fuel alloy, f is the fission rate density (fissions.cm^{-3}.s^{-1}), Δt is time (seconds), and R represents the gas constant (1.987 cal.mole^{-1}.K^{-1}), and T is the temperature (K).

The presence of Mo in U introduces a complexity to the interdiffusion behavior of U–Mo. Aluminum reacts with molybdenum, forming intermetallic or ternary phases, such as $U_6Mo_4Al_{43}$ and UMo_2Al_{20}, $U_6Mo_4Al_{43}$. However, adding some wt% Si to the Al matrix can retard the formation of the UMo/Al interaction layer and change the properties of the interaction phase. Since silicon has a higher chemical affinity for U than Al, this way, it forms a silicon-rich interface layer between UMo particles and Al, which retards UMO/Al interdiffusion but does not avoid it.

CONCLUSION

This research was based on the physical properties of aluminum dispersions fuel, such as U/Al, U3O8/Al, U3Si2/Al, and U10Mo/Al. Many behaviors analyzed strongly depend on thermal conductivity, thermal expansion, fission-induced swelling, and interaction layer growth. Besides, the results used are over time databases produced in international research programs, such as RERTR, SELENIUM, and FUTURE, resulting from a large irradiation spectrum. Studying the thermal properties, such as thermal conductivity and expansion, can produce an understanding of fuel plate deformation behavior. The thermal properties fundamental for a simulating mechanical response have been a critical safety aspect. The production of an interaction layer is an unwanted effect that reduces the life of fuel plates.

Over the years, a rapid evolution in the manufacturing route of dispersion fuels has occurred, and many results reported do not offer a perfect conclusion of values, showing significant uncertainties. However, its model for fuel meat swelling is based on published in the open literature. The mathematical models got from swelling results from diversified experimental data and theoretical results. There are a few interaction layer growth models, partly because of the vast gamma of nuclear facilities employed. Besides, each laboratory uses a particular manufacturing route and works with different fuels composition and other aluminum cladding. Although the maximum IL thickness can achieve 1.68 mm, it decreases the thermal conductivity of the fuel meat, especially under the significant fission rate and long irradiation time.

ACKNOWLEDGMENT

The Energy and Nuclear Research Institute (IPEN/CNEN) sponsored this work, and the author is grateful for the motivation that assisted in this research.

REFERENCES

[1] X. Iltis et al., “Microstructural characterization of atomized U_3Si_2 powders with different silicon contents (7.4–7.8 wt%)”, 2023, *Journal of Nuclear Materials*, vol. 573, pp: 154141.

[2] I. Pioro et al., Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*:* A Guidebook, 2022, Woodhead Publishing.

[3] R. Konings, and S. Roger., Comprehensive nuclear materials. 2020, Elsevier.

[4] D. Chandler et al., “Neutronic and thermal-hydraulic feasibility studies for High Flux Isotope Reactor conversion to low-enriched uranium silicide dispersion fuel,” 2019, *Annals of Nuclear Energy v*ol. 139. pp: 277-292.

[5] Z. Mei et al., First-principles study of surface properties of uranium silicides. 2019, *Journal of Nuclear Materials* 513 pp: 192-197.

[6] A. Leenaers et al., Effect of fission rate on the microstructure of coated UMo dispersion fuel. 2017, *Journal of Nuclear Materials* vol. 494, pp 10-19.

[7] D. D. Keiser et al., The use of U_3Si_2/Al dispersion fuel for high power research reactors, 2020, *Journal of Nuclear Materials* vol. 528: 151820.

[8] D. Frazer et al., “High-temperature mechanical properties of fluorite crystal structured materials (CeO_2, ThO_2, and UO_2) and advanced accident tolerant fuels (U_3Si_2, UN, and UB_2). 2021, Journal of Nuclear Materials 554: 153035.

[9] R. D. Mariani et al., Initial Evaluation of Fuel-Reactor Concepts for Advanced LEU Fuel Development. 2020, No. INL/EXT-20-54641. Idaho National Lab. (INL); Idaho Falls, ID (United States); Oak Ridge National Lab. (ORNL); Oak Ridge, TN (United States); Argonne National Lab. (ANL); Argonne, IL (United States).

[9] E. H. Wilson et al., US High-Performance Research Reactor Preliminary Design Milestone for Conversion to Low Enriched Uranium Fuel. 2019, Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).

CAPÍTULO 21

MODELAGEM DE ENSINO REMOTO PARA AULAS DE PRÉ-CÁLCULO NA ENGENHARIA

Data de aceite: 01/04/2024

Ubirajara Carnevale de Moraes
Universidade Presbiteriana Mackenzie - Mackenzie

Vera Lucia Antonio Azevedo
Universidade Presbiteriana Mackenzie - Mackenzie

RESUMO: O presente artigo tem por objetivo investigar como um Ambiente Virtual de Aprendizagem pôde ser organizado durante a pandemia para atender aos conteúdos de Matemática no Ensino Superior de forma a dar autonomia ao aluno, sem interromper seus estudos. Para tal, contextualizou-se a pandemia do novo Coronavírus (INSTITUTO BUTANTÃ, 2021; OPAS, 2020; VIEIRA & SILVA, 2020), bem como Ambiente Virtual de Aprendizagem (VELOSO & MILL, 2021; GAMA, 2014; MORAN, 2018), a Sala de Aula Invertida (TORI, 2020) e trilhas de aprendizagem (LIMA, 2019), por meio de pesquisa bibliográfica e documental. Ademais, apresenta-se a experiência dos autores na construção de um Ambiente de Aprendizagem Virtual, embasado na teoria da Sala de Aula Invertida, que foi idealizado para ser aplicado junto a turmas de pré-cálculo em uma instituição de Ensino Superior. Dentre os resultados obtidos, percebeu-se que o Ambiente Virtual de Aprendizagem auxilia no desenvolvimento de competências do aluno como a autonomia, responsabilidade, organização pessoal e dedicação. Além disso, mesmo alunos com problemas de aprendizagem beneficiam-se tanto das múltiplas atividades e circuitos propostos nas trilhas, como da atenção especial prestada pela equipe de professores e monitores que supervisionam e facilitam o processo nesse novo e rico espaço escolar.

PALAVRAS-CHAVE: Ensino Remoto; Educação Matemática; Ensino nas Engenharias.

REMOTE TEACHING MODELING FOR PRECALCULUS CLASSES IN ENGINEERING

ABSTRACT: This paper aims to investigate how a Learning Virtual Environment could be organized during the pandemic to attend the Mathematics contents in Higher Education, fostering the autonomy of the students and preventing the interruption of the learning process. For this purpose, the Coronavirus pandemic was contextualized (INSTITUTO BUTANTÃ, 2021; OPAS, 2020; VIEIRA & SILVA, 2020) as well

as Learning Virtual Environment (VELOSO & MILL, 2021; GAMA, 2014; MORAN, 2018), Flipped Classroom (TORI, 2020) and Learning Tracks (LIMA, 2019) through bibliographic research. Furthermore, an experience of the authors in the construction of a Virtual Learning Environment is presented, based on the Flipped Classroom Theory, which was designed to serve the pre-calculus classes in a Higher Education institution. Among the results obtained, it was noticed that the Virtual Learning Environment helps in the development of student skills such as autonomy, responsibility, personal organization and dedication. In addition, even students with learning problems benefit both from the multiple activities and circuits proposed on the trails, as well as from the special attention provided by the team of teachers and monitors who supervise and facilitate the process in this new and rich school space.
KEYWORDS: Remote Teaching; Mathematics Education; Engineering Teaching.

INTRODUÇÃO

Em 31 de dezembro de 2019, a Organização Mundial da Saúde (OMS) foi notificada sobre diversos casos de um tipo ainda não identificado de pneumonia na cidade de Wuhan (China). Essa doença respiratória, causada por um coronavírus, se espalhou rapidamente pelo mundo, caracterizando-a como uma pandemia, que é uma doença que se dissemina em diversos continentes, atingindo muitas pessoas (Instituto Butantan, 2021).

Em janeiro de 2020, a OMS declarou que o surto do novo coronavírus, já atingia dezenove países e continuava se espalhando. Um novo nome foi adotado para facilitar sua pronúncia e não estigmatizar nenhum país ou população. Assim, passou a ser chamado de Covid-19, um acrônimo formado por “Co” de corona, “vi” de vírus, e “d” representa “doença”, seguido pelo número 19 que indica o ano de seu surgimento. Com o aumento diário de casos e a contaminação em diversos países e regiões do planeta, a OMS classificou como uma emergência de saúde pública de importância internacional (OPAS, 2020).

No Brasil, o primeiro caso ocorreu em fevereiro de 2020 e logo novos casos foram surgindo em todo o território nacional.

De acordo com Vieira e Silva (2020, 1044), o cenário da pandemia, exigiu do governo e órgãos de saúde, a adoção de medidas legais, oficialmente publicadas, como estratégia de conter a propagação da doença.

As autoridades governamentais brasileiras deram início à uma série de medidas legais e portarias que visavam regulamentar as práticas de ensino com a substituição das disciplinas presenciais, em andamento, por aulas que utilizassem meios e tecnologias de informação e comunicação (BRASIL, 2020).

O amparo dado pelo Decreto Lei 1044/69, de 21 de outubro de 1969, combinado com a Portaria MEC/GM nº 343, de 17 de março de 2020, que regulou de maneira especial os regimes a serem instituídos enquanto durar a situação de Pandemia do COVID-19, formalizaram a continuidade dos cursos presenciais nos meios virtuais.

Assim, a mudança repentina do ensino presencial e semipresencial para o remoto,

exigiu das instituições de Ensino, uma adequação das aulas, materiais, atividades, avaliações, bem como uma nova sistemática para ensinar e aprender por parte de alunos e professores. Não havia alternativa, já que o distanciamento social e os períodos de quarentena tinham impacto direto na vida escolar do país.

Com isso, foi necessário à sociedade, de um modo geral, e à Universidade, de forma particular envolvendo o processo de ensino e aprendizagem, o desafio de uma adaptação e transformação dos modelos tradicionalmente usados (Organization for Economic Co-operation and Development, 2020), levando à adoção e à criação de novos modelos educacionais sustentados pelas tecnologias digitais e pautado nas metodologias da educação on-line (VIEIRA; SILVA, 2020).

Como o objetivo de proporcionar condições ao professor universitário, e no caso desta pesquisa, docente que leciona matemática nas primeiras etapas do curso de Engenharia, foi realizada a construção de um modelo utilizando um ambiente virtual, materiais disponíveis na Internet em conjunto com ferramentas e metodologias da tecnologia educacional.

Foi realizado um piloto com o intuito de criar um ambiente virtual utilizado por alunos e professores, permitindo observar estratégias que funcionaram adequadamente e outras que não surtiram um efeito satisfatório. Dessa forma, este artigo tem como objetivo, apresentar uma nova versão da modelagem de um ensino remoto para as aulas de Pré-Cálculo no Ensino da Engenharia, podendo ser adaptada para outros componentes curriculares.

O AMBIENTE VIRTUAL DE ENSINO E APRENDIZAGEM

Sempre que uma inovação surge na ceara dos educadores, é observado, de um lado certo deslumbramento com as possibilidades oferecidas e por outro, um clássico ceticismo quanto ao uso de recursos tecnológicos no processo de ensino e aprendizagem.

Sem dúvida, a participação tradicional do professor será sempre bem-vinda e necessária.

Mesmo usando um conjunto de recursos tecnológicos, há a necessidade de um educador que faça o planejamento, a organização, a articulação, a implementação, a avaliação e o refinamento para que os resultados positivos sejam alcançados a contento.

Assim, a Tecnologia Educacional é uma forma sistemática de utilizar recursos tecnológicos, em múltiplos meios, para a busca da eficiência do processo de Ensino e Aprendizagem.

Segundo Veloso e Mill (2021), juntamente a todas as modificações que têm acompanhado o rádio e a TV na contemporaneidade, surgem também novas linguagens e, consequentemente, novas potencialidades pedagógicas. Com isso, diversas são as experiências envolvendo a intersecção entre mídias de imagem e som, as novas tecnologias e o âmbito educacional.

Com o uso de recursos tecnológicos na Educação, emergem os Ambientes Virtuais

de Ensino e Aprendizagem (AVA), um novo espaço escolar que pode ser um apoio ao ensino presencial ou uma alternativa em situações como a Pandemia, onde os alunos não puderam, por muito tempo, comparecer presencialmente às aulas. Outras situações podem justificar o uso dos Ambientes Virtuais como uma licença médica, necessidade de reforço às aulas ou alunos com limitações físicas para se deslocar até a Universidade.

Nesse novo "habitat tecnológico", o conhecimento é construído com a participação ativa do aluno que encontra em um espaço alternativo à sala de aula, múltiplas possibilidades de leitura, audição, escrita, comunicação e interação. São inúmeros recursos disponíveis no Ambiente Virtual que de forma planejada e organizada pelo professor, podem desenvolver, cognitivamente, o aluno. Para Gama (2014, p.66), "O Ambiente Virtual permite praticar o ensino e aprendizagem, a partir de uma abordagem sociocultural, dialógica e de incentivo ao desenvolvimento da autonomia do próprio aluno".

Diante dessa possibilidade de usar os Ambientes Virtuais para levar materiais de estudo e atividades selecionadas pelo professor e que estão disponíveis tanto no AVA quanto no acervo da Internet, e ainda permitir a interação e comunicação entre os alunos e deles com o professor, surge a seguinte questão: como um Ambiente Virtual pode ser associado ao processo educacional no ensino da matemática em uma condição pandêmica em que os alunos estão geograficamente distantes da Universidade?

Assim, o presente estudo teve como objetivo geral, pesquisar como o Ambiente Virtual pôde ser organizado durante a pandemia aos conteúdos de Matemática no Ensino Superior de forma a dar autonomia ao aluno, sem interromper seus estudos.

Existem inúmeros tipos de Ambiente Virtual com diferentes características, alguns muito caros e outros gratuitos.

Um dos Ambientes Virtuais gratuitos, mais utilizado ao redor do mundo, é o Moodle (*Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment*) que além de possuir inúmeros recursos digitais disponíveis, tem código aberto e permite sua customização.

Todas essas características oferecem ao usuário do Moodle, a possibilidade de personalizá-lo e assim criar uma modelagem própria para cada situação de ensino, independente do grau escolar, do público-alvo e até das necessidades especiais de um ambiente inclusivo.

O uso da Ambiente Virtual pode levar a realização da aula presencial para o universo virtual, permitindo que o aluno que não pode comparecer à sala de aula, tenha contato com o conteúdo programático e participe de um processo de aprendizagem diferente do tradicional.

O professor, nesse caso, poderá sempre usar de sua criatividade e a capacidade ímpar de construir espaços adequados ao processo de ensino, aliás conquistado ao longo de sua prática docente, agora adaptada e modernizada pelo ensino remoto.

Nesse novo modelo, a separação física entre alunos e professores será amenizada

por intermédio da criação de um novo modelo de ambiente interativo, amigável, responsivo, motivador, facilitador, estimulante, rico e diversificado em recursos tecnológicos para apoio ao aluno, enfim um espaço preparado para a realização da aula remota, voltada a permitir ao aluno do Século XXI, a continuidade de seus estudos.

Para Bacich e Moran (2018), os alunos têm grande facilidade de acesso à informação, participando de redes sociais e colaborativas com pessoas com as quais compartilham conhecimentos, valores, práticas e descobertas.

Neste projeto, foi utilizado o Ambiente Virtual Moodle com modelagem voltada ao ensino da Matemática do Ensino Superior da Engenharia, contando com o acesso ao acervo selecionado da Internet (links e vídeos), customização de ferramentas e recursos de comunicação/interação do próprio Ambiente, bem como o uso da biblioteca virtual da Universidade.

O crescente interesse do aluno universitário em seu cotidiano pela tecnologia favorece a adoção pelo uso de Ambientes Virtuais nas aulas, especialmente no período da pandemia, permitindo seu contato com as aulas, colegas, professores e suprimindo suas necessidades para o acompanhamento escolar.

MODELAGEM DO AMBIENTE VIRTUAL

Para a organização do Ambiente Virtual foi constituída uma equipe multidisciplinar com o intuito de personalizar o Moodle de forma a atender o aluno remotamente e ao mesmo tempo permitir ao professor usar esse novo espaço e o protagonismo do aluno para a realização das aulas remotas.

A equipe era constituída pela coordenadora de Matemática da Universidade Presbiteriana Mackenzie, uma pedagoga, um professor especialista no uso educacional do Ambiente Virtual Moodle e alunos monitores que cursavam licenciatura em matemática na mesma Universidade. Todos participaram de reuniões antes do início do projeto e uma capacitação sobre o uso do Moodle e sobre a metodologia *Flipped Classroom* (sala de aula invertida), ambas para discussão sobre o modelo idealizado.

Apesar da Sala de Aula Invertida ser muito utilizada no Ensino Híbrido, conforme afirma Tori (2009), como sendo dois ambientes de aprendizagem que historicamente se desenvolveram de maneira separada, a tradicional sala de aula presencial e o moderno Ambiente Virtual que vêm se descobrindo mutuamente complementares, agora será realizada totalmente on-line, sem a presencialidade, mas com o mesmo efeito e a possibilidade dos alunos terem acesso ao conteúdo antes do encontro síncrono com o professor.

Mas para isso, é necessário que haja um estudo elaborado pelo professor, semana a semana, do que será abordado nas aulas remotas para a consequente elaboração do planejamento de atividades no Ambiente Virtual.

Os recursos tecnológicos foram escolhidos pelo professor com objetivos pedagógicos

bem definidos e no momento oportuno em cada aula. Foram também definidos, o papel do aluno e do professor em uma abordagem de Metodologia Ativa, ou seja, o aluno assumindo o protagonismo do processo e colocando em prática, outras habilidades como afirma Lovato et al (2018) como a iniciativa, a criatividade, a criticidade reflexiva, a capacidade de autoavaliação e a cooperação para se trabalhar em equipe.

Os conteúdos matemáticos que foram explorados no projeto foram: Conjuntos numéricos; Regras de potenciação; Produtos notáveis e fatoração; Equação e inequação; Funções e representação gráfica; Funções Exponenciais e logarítmicas; Trigonometria; Transformação trigonométrica; Matrizes e Determinantes, e Sistemas lineares.

A intenção em oferecer um reforço nesses tópicos foi fortalecer conceitos matemáticos, muito importantes para dar base aos universitários na aprendizagem do Cálculo Diferencial e Integral.

No ambiente virtual Moodle, disposto em abas (Figura 1), o projeto foi estruturado em dez semanas, permitindo a fácil localização dos temas da matemática, por parte do corpo discente.

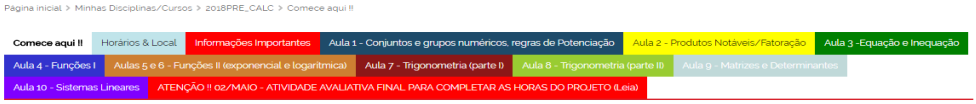


Figura 1 – Dez semanas no Ambiente Virtual

Fonte: próprio autor

O aluno recebe o acolhimento e faz a ambientação do Ambiente Virtual, uma semana antes para que compreenda a sistemática adotada, bem como o teste de acessos e resolução de pendências junto à equipe que conduzirá o projeto durante as aulas.

Porém, para o professor, ainda resta o desafio de organizar o Ambiente Virtual de forma que permita ao aluno navegar em um ensino remoto com inúmeras possibilidades de ferramentas e recursos, mas com a meta de levá-lo à obtenção de conhecimento, colocando-o no centro do processo de aprendizagem.

Para tanto, o professor organizou previamente as atividades idealizadas para cada semana com o intuito de que o aluno desenvolva as tarefas previstas e o próprio Ambiente Virtual poderá conduzi-lo à semana seguinte ou voltar no ponto necessário até conseguir ser promovido para o próximo tópico, lembrando que os tópicos já foram definidos pela professora de matemática como fundamentais para os estudos de Cálculo no Ensino Superior.

A essa organização idealizada pelo professor que estrutura o caminho que o aluno irá trilhar remotamente, foi denominada “trilha de aprendizagem”.

Para Lopes e Lima (2019), a definição de trilha pode assumir, de forma literal, como

um caminho estreito ou um vestígio deixado no lugar por onde se passa e, de forma, figurada como um caminho a ser seguido, trajeto, itinerário ou mesmo, “o conjunto de passos, e procedimentos, uma receita” (p. 172).

Como se trata de uma trilha voltada à aprendizagem, pode ser considerada como um caminho ou modelo a ser seguido para aprender. A trilha representa a intenção do professor no sentido do ensinar e, para o aluno, a sequência de passos idealizados por esse professor para que ele possa seguir independente, de acordo com seu desempenho, para buscar o conhecimento.

A ideia de construir trilhas em um ambiente virtual, permite que o aluno tenha um modelo a orientá-lo, especialmente no momento em que o ensino é remoto e o afasta da aula tradicional, local onde o professor articula o horário da aula, mesclando conteúdos teóricos, exercícios, atividades de fixação e interações entre os participantes.

Assim, em cada semana, o aluno é norteado por intermédio de uma trilha de aprendizagem diferente que o auxilia a estudar, tirar suas dúvidas, obter mais segurança e fluência matemática naquele fundamento imprescindível ao estudo do Cálculo. Os obstáculos a serem vencidos, podem ser revistos nas trilhas subsequentes refazendo atividades que possam lhe ajudar em seu fortalecimento matemático.

Inúmeras são as possibilidades de montagem de uma “trilha de aprendizagem” que pode contar com estações contendo atividades remotas que oferecem ao aluno:

- Leitura de material teórico disponível em e-book da biblioteca virtual da Universidade ou site da Internet previamente avaliado pelo professor;
- Podcasts do professor que destaca conceitos importantes naquele assunto;
- Exemplos com exercícios resolvidos no e-book da biblioteca virtual ou YouTube;
- Atividade com exercícios propostos no e-book da biblioteca virtual ou YouTube;
- Fórum de dúvidas em cada tópico;
- Videoaula gravada disponíveis na Internet previamente avaliada pelo professor;
- Aula on-line remota com o professor (síncrono);
- Videoconferência com os alunos monitores (síncrono);
- Atividades lúdicas digitais, tais como jogo de memória, caça palavras, preencher lacunas, questionários de múltipla escolha, entre outras.

Os alunos que apresentarem dificuldade com problemas de aprendizagem e até mesmo aqueles que estão com os conteúdos escolares anteriores defasados, permanecerão na trilha, contando com novas atividades e conteúdos programados para isso, e serão encaminhados à estação dos alunos monitores (plantão) que mesmo remotamente, poderão auxiliar esse contingente, de forma mais próxima.

Os alunos monitores que previamente resolviam todos os exercícios e montavam

gabaritos das atividades, garantindo estar aptos a atender os alunos que precisavam de maior atenção, representam uma estação de plantão diferenciada, pois além do conhecimento em Matemática mais consolidado, também proporcionavam um diálogo eficiente por pertencer à mesma geração dos estudantes.

Essa estação "plantão de monitores" funciona como uma videoconferência aberta com horários definidos, onde os alunos tiram suas dúvidas com toda a equipe, mas que também participam na solução de problemas matemáticos em conjunto com seus colegas, chegando a resolver exercícios sem a intervenção dos monitores e até explicando a solução para seus colegas de turma. Essa ação promoveria a reflexão e troca de soluções aos problemas enfrentados, oferecendo a possibilidade de os alunos ajudarem seus próprios pares.

TRILHA DE APRENDIZAGEM NO AMBIENTE VIRTUAL

Para cada aba do Ambiente Virtual, o aluno encontra uma trilha diferente (Figuras 2 e 3) definida pelo professor e abordando os conceitos necessários para o assunto da semana que será desenvolvido remotamente.

Assim, por exemplo, na aba da semana sobre "Equações", o aluno encontra um circuito de ações (Figura 2) idealizadas pelo professor do componente curricular e que levariam o aluno a interagir com o material didático, atividades lúdicas como exercícios (Hotpotatoes, JClic, Socrative, Khoot, Mentimeter, Simulados on-line, Padlet, Docs compartilhados, questionários Moodle, entre outros) e atividades tradicionais (como exercícios do e-book), encontros on-line com professor e com monitores, e avalições síncronas em uma a abordagem formativa que sinalizam, ao longo dos circuitos, como o aluno está reagindo às avaliações e interações com aquele conteúdo abordado.

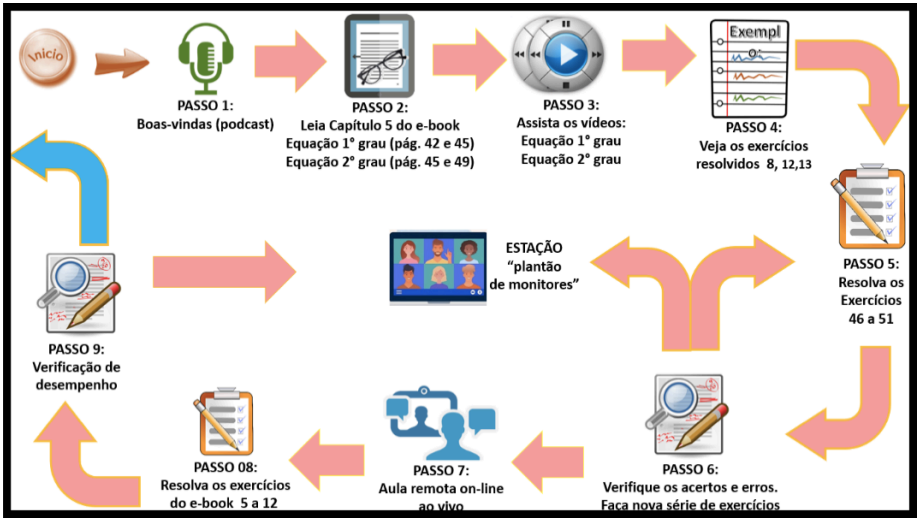


Figura 2 – Trilha de Equações.

Fonte: próprio autor

Para estimular a atenção dos alunos, a cada nova aba, novos circuitos são construídos

com cores diferentes e diversificadas estações de atividades (Figura 3). Essa pluralidade entre as trilhas tem como objetivo evitar que as diferentes trilhas sejam similares, que a realização da trilha da semana seja monótona com os mesmos elementos da anterior.

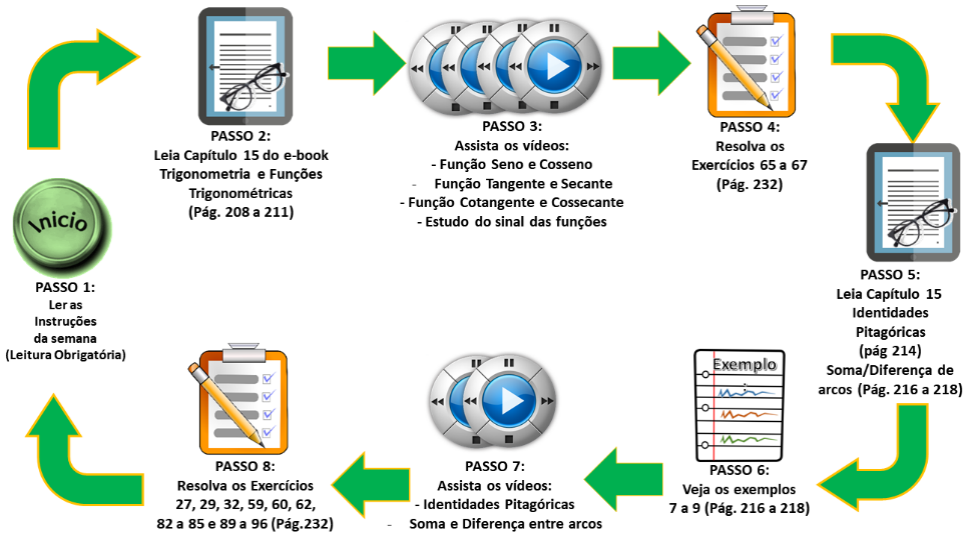


Figura 3 – Trilha de Trigonometria

Fonte: próprio autor

O jovem universitário, em sua maioria, gosta de novos desafios e perde a atenção com conteúdos escolares dados sempre da mesma forma ou no mesmo formato.

Em todas as trilhas do projeto, a metodologia da “sala de aula invertida” está presente, já que o aluno tem contato com o determinado conteúdo e de forma variada (texto, exercícios resolvidos e exercícios propostos e vídeo) para depois interagir com o professor na aula ao vivo, síncrona e remota.

Ao final do circuito, o aluno novamente realiza exercícios de aprofundamento sobre o tema e poderá recorrer ao plantão de monitores.

Os resultados em cada circuito realizado pelo aluno podem trazer informações valiosas ao professor.

Para Silva (2006),

> A avaliação da aprendizagem na sala de aula online requer rupturas com o modelo tradicional de avaliação historicamente cristalizado na sala de aula presencial. Se o professor não quiser subutilizar as potencialidades próprias do digital online, ou se não quiser repetir os mesmos equívocos da avaliação tradicional, terá de buscar novas posturas, novas estratégias de engajamento no contexto mesmo da docência e da aprendizagem e aí redimensionar suas práticas de avaliar a aprendizagem e sua própria atuação (SILVA, 2006, p. 23).

Assim, o professor tem acesso ao desempenho dos alunos e aos resultados das

atividades e avaliações realizadas em cada circuito, podendo agir de forma investigativa, de interpretação e de reação para a próxima trilha e com intervenções em sua próxima aula remota.

Para Bianchi (2021, p. 12), essa preocupação e observância do professor sobre o desempenho dos alunos nas trilhas de aprendizagem tem a finalidade de orientação para que possam ser feitos ajustes (nas próximas trilhas e em sua prática docente) para converter possíveis dificuldades dos alunos em momentos de aprendizagem.

Ao final da trilha da semana, os alunos caminham para a próxima trilha em uma espiral de aprendizagem, já que o conjunto das trilhas definidas, compõe os conceitos necessários para se trabalhar com o futuro Cálculo Diferencial e Integral. Segundo Valente (2005, p. 12) em toda espiral há um ponto inicial, aqui representado pelo conhecimento do aluno ao ingressar no Ensino Superior e um ponto final, muitas vezes inatingível, mas que mantém "a espiral de aprendizagem em ação produzindo crescentes níveis de compreensão e de aprendizagem".

A meta desejada é construir trilhas de aprendizagem, compostas pelos pré-requisitos matemáticos e conceitos necessários ao acompanhamento do Cálculo. Essa espiral usada na realização das aulas remotas, utilizará o ambiente virtual de acordo com o modelo apresentado. A espiral de aprendizagem representa a decomposição matemática (não biológica, evidentemente) do Cálculo e o aluno a percorrerá os circuitos pelas trilhas e subindo nível a nível até completar toda a espiral.

Para o presente projeto, a espiral de aprendizagem pode ser representada como indicado na figura 4:

Figura 4: Espiral de aprendizagem do Pré-cálculo

Fonte: Adaptado de https://adriancahill.com/wp-content/uploads/2016/06/Spiral-Dynamics.jpeg

As trilhas de aprendizagem variam semana para semana, dependendo de seu

conteúdo, da complexidade do tema e dos recursos usados. O conteúdo que exige um número maior de atividades apresentará uma trilha de aprendizagem com maior detalhamento, assim como encontramos também situações com poucas atividades, mas sempre com a realização da aula remota on-line síncrona e da estação on-line de monitores.

Após realizar todas as trilhas, em circuitos diferentes, de acordo com seus conhecimentos e desempenho, o aluno teve contato com todos os fundamentos necessários para acompanhar as aulas do componente curricular de Cálculo Diferencial e Integral I do curso de Engenharia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No ensino remoto, mais do que nunca, o aluno deve tornar-se o protagonista central. Suas ações no Ambiente virtual permitem o desenvolvimento de competências, como autonomia nos estudos, responsabilidade, organização pessoal e dedicação ao conhecimento. O professor atua como orientador, supervisor e facilitador do processo e pode empreender sua experiência docente na organização do Ambiente Virtual, um novo e rico espaço escolar.

Alunos com problemas de aprendizagem ou defasados pela falta de fundamentos não vistos anteriormente, precisam de uma atenção especial, especialmente por ainda não terem alcançado sua autonomia no processo de aprendizagem. As múltiplas atividades e circuitos realizados por esse contingente nesse modelo para o Ambiente Virtual poderão auxiliar em seu futuro acompanhamento das aulas de Cálculo no ensino superior, bem como pode ser adaptado para outros componentes curriculares da Engenharia.

REFERÊNCIAS

BACICH, L.; MORAN, J. **Metodologias ativas para uma educação inovadora**: uma abordagem teórico prática. Porto Alegre: Penso, 2018.

BIANCHI, P. C. F. **Avaliação em processos de aprendizagem na Educação a Distância**. São Carlos : SEaD-UFSCar, 2021.

BRASIL. Ministério da Educação. **Portaria nº 544/2020**. Brasil: Conselho Nacional de Educação, 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-544-de-16-de%20junho-de-2020-261924872>. Acesso em 02 jul. 2021.

GAMA, A. M. **Ambiente virtual de aprendizagem no contexto presencial do ensino médio**: indícios de autonomia na escrita via estratégias de aprendizagem. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/MGSS-9PRQ9K>. Acesso em: 24 jul. 2021.

GLASSER, W. **Control theory in the classroom**. New York: Perennial Library, 1986.

INSTITUTO BUTANTAN. **Entenda o que é uma pandemia e as diferenças entre surto, epidemia e endemia**. Disponível em: <https://butantan.gov.br/covid/butantan-tira-duvida/tira-duvida-noticias/entenda-o-que-e-uma-pandemia-e-as-diferencas-entre-surto-epidemia-e-endemia>. Acesso em: 03 jul. 2021.

LOPES, P. LIMA, G. A. **Estratégias de Organização, Representação e Gestão de Trilhas de Aprendizagem**: uma revisão sistemática de literatura. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pci/a/9sY8wHY966VgpqJppyLT5Md/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 26 jul. 2021.

LOVATO, F. L.; MICHELOTTI A.; SILVA, C. B.; LORETTO, E. L.S. **Metodologias Ativas de Aprendizagem**: Uma Breve Revisão. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/327924688_Metodologias_Ativas_de_Aprendizagem_Uma_Breve_Revisao>. Acesso em: 20 jul. 2021.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Supporting the continuation of teaching and learning during the COVID-19 Pandemic**: Annotated resources for online learning. Paris: OECD Publishing. Disponível em: <https://www.oecd.org/education/Supporting-the-continuation-of-teaching-and-learning-during-the-COVID-19-pandemic.pdf >. Acesso em: 12 jul. 2021.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DE SAÚDE. **Folha informativa sobre COVID-19**. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/covid19>. Acesso em: 02 jul. 2021.

SILVA, M. O fundamento comunicacional da avaliação da aprendizagem na sala de aula online. In: SILVA, M.; SANTOS, E. (Orgs.). **Avaliação da aprendizagem em educação online**. São Paulo: Loyola, 2006.

SILVA, I. P. **Estilos de aprendizagem e materiais didáticos digitais nos cursos de licenciatura em matemática a distância**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2015.

TORI, R. Cursos híbridos ou blended learning. In: LITTO, Frederic Michael; FORMIGA, Manuel Marcos Maciel (Orgs.). **Educação a Distância**: o estado da arte. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.

VALENTE, J. A. **A espiral da espiral de aprendizagem**: o processo de compreensão do papel das tecnologias de informação e comunicação na educação. Disponível em: < http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/284458/1/Valente_JoseArmando_LD.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2021.

VELOSO, B.; MILL, D. **Linguagem da TV e da rádio na educação**. São Carlos: SEaD-UFSCar, 2021.

VIEIRA, M. F.; SILVA, C. M. S. **A Educação no contexto da pandemia de COVID-19**: uma revisão sistemática de literatura. Disponível em: <https://www.br-ie.org/pub/index.php/rbie/article/view/v28p1013>. Acesso em 02 jul. 2021.

CAPÍTULO 22

O ENSINO DA MATEMÁTICA BÁSICA NOS CURSOS DE ENGENHARIA FLORESTAL CORRELACIONADA COM AS NECESSIDADES DAS EMPRESAS DA ÁREA: ELABORAÇÃO DE MATERIAL DIDÁTICO PARA O ENSINO DE EQUAÇÃO DO PRIMEIRO E SEGUNDO GRAU

Data de aceite: 01/04/2024

Liliana K. J., de MOURA
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Campus Cáceres - Professor Olegário Baldo, Mato Grosso, Brasil

Willian dos S., RODRIGUES
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Campus Cáceres - Professor Olegário Baldo, Mato Grosso, Brasil

Juliana P. L. P., dos PASSOS
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Campus Cáceres - Professor Olegário Baldo, Mato Grosso, Brasil

Luis F. S., VANINI
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Campus Cáceres - Professor Olegário Baldo, Mato Grosso, Brasil

RESUMO: Este artigo visa apresentar o resultado parcial da pesquisa que tem como objetivo "conhecer e compreender o foco e as necessidades das empresas que desenvolvem atividades na área da Engenharia Florestal, na região de Cáceres - MT, para verificar os conteúdos matemáticos que poderão contribuir com o desenvolvimento dessas empresas, de forma a elaborar um material didático digital com atividades matemáticas aplicadas às necessidades, atendendo as expectativas comerciais e econômicas da região". A pesquisa foi dividida em 3 etapas, com duração total de 3 anos. A primeira etapa, anos 2022/2023, foi dividida em três fases: **primeira fase –** foi realizada a pesquisa bibliográfica e entrevistas com professores e engenheiros florestais; **segunda fase –** foi marcada pela análise dos dados coletados na fase anterior. Em seguida, elaboraram-se propostas de atividades com os conteúdos de equações do primeiro grau, do segundo grau, exponencial e logarítmica; **terceira fase –** realizou-se a seleção das questões que comporão o primeiro capítulo do material didático digital. A pesquisa está na segunda etapa, anos 2023/2024, com elaboração de mais questões, envolvendo outros conteúdos matemáticos.

PALAVRAS-CHAVE: Matemática. Engenharia Florestal. Material didático.

THE TEACHING OF BASIC MATHEMATICS IN FOREST ENGINEERING COURSES CORRELATED WITH THE NEEDS OF COMPANIES IN THE AREA: PREPARATION OF TEACHING MATERIAL FOR TEACHING EQUATIONS IN FIRST AND SECOND GRADE

ABSTRACT: This article aims to present the partial result of the research that aims to "know and understand the focus and needs of companies that develop activities in the area of Forestry Engineering, in the region of Cáceres - MT, to verify the mathematical contents that could contribute to the development of these companies, in order to prepare digital teaching material with mathematical activities applied to the needs, meeting the commercial and economic expectations of the region". The research was divided into 3 stages, lasting a total of 3 years. The first stage, 2022/2023, was divided into three phases: **first phase:** bibliographical research and interviews with professors and forestry engineers were carried out; **second phase:** it was marked by the analysis of data collected in the previous phase. Then, activity proposals were prepared with the contents of first-degree, second-degree, exponential and logarithmic equations.; **third phase**: the questions that will make up the first chapter of the digital teaching material were selected. The research is in the second stage, 2023/2024, with the elaboration of more questions, involving other mathematical content.
KEYWORDS: Mathematics, forest engineering, Courseware.

INTRODUÇÃO

Apesar da grande importância da Matemática, de acordo com Dias (2019), ela é uma das disciplinas que causam pavor em muitos, os quais, na maioria das vezes, não acreditam que haja finalidade em tantas formas e problemas difíceis de resolver. Dessa forma, apesar de ser um desafio, a melhor opção seria relacionar o aprendizado matemático com o que se vive, pois quando se descobre essa relação, a disciplina se torna mais fácil de ser entendida e compreendida (Dias, 2019).

A matemática é uma disciplina bastante presente na vida do ser humano, por isso é muito importante, pois está presente em quase todos os lugares e diversas profissões. Entretanto, "percebe-se que grande parte dos alunos apresenta dificuldades em raciocinar ou até mesmo de relacionar os conteúdos estudados na escola com as realidades enfrentadas no convívio do trabalho e da sociedade (Miguel; Natti, 2009, p. 03).

Em face do exposto, a matemática deve ser destacada pela sua importância, relacionando a teoria com a prática, a fim de se perceber suas aplicações na vida, em especial, na vida profissional. Nesse contexto, os conteúdos da disciplina de matemática se aplicam a diversas áreas, e podem despertar nos alunos a capacidade de interpretar e resolver situações práticas.

Diante disso, acredita-se que a disponibilização de materiais mais específicos para determinadas disciplinas dos cursos superiores pode contribuir para melhorar a interpretação dos entes matemáticos, assimilação dos conceitos práticos na atividade profissional com os quais o estudante se deparará, e também uma associação entre teoria e prática.

À vista da problemática da dissociação do ensino teórico com a prática matemática, foi proposto um projeto de pesquisa com o objetivo de “conhecer e compreender o foco e as necessidades das empresas que desenvolvem atividades na área da Engenharia Florestal, na região de Cáceres - MT, para verificar os conteúdos matemáticos que poderão contribuir com o desenvolvimento dessas empresas, visando elaborar um material didático digital com atividades matemáticas aplicadas às necessidades, atendendo às expectativas comerciais e econômicas da região”.

O material será de grande valia, pois contribuirá com o processo de ensino e aprendizagem dos alunos do curso Bacharelado em Engenharia Florestal e de outros cursos da área Agrária, preparando melhor os futuros profissionais, uma vez que terão contato com atividades práticas de matemática durante o desenvolvimento do curso, atividades essas que serão utilizadas na vida profissional, atendendo **à** demanda das empresas da área na região de Cáceres.

Dessarte, o resultado dessa pesquisa contribuirá com o IFMT para cumprir sua missão, pois ajudará na formação para a vida e para o trabalho dos acadêmicos, dando maior visibilidade para o IFMT, além de colaborar com outras instituições de ensino.

Dessa forma, este artigo tem como objetivo apresentar o resultado da pesquisa, ora citada, e mostrar duas atividades aplicadas, as quais envolvem equação do primeiro grau e equação do segundo. A parte da pesquisa que envolveu equação exponencial e equação logarítmica foi publicada nos Anais do Workif /IFMT-2023, por outros participantes da pesquisa.

MATERIAL E MÉTODOS (OU PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS)

A pesquisa teve a pretensão de contribuir com o ensino da matemática do curso Bacharel em Engenharia Florestal do IFMT - Campus Cáceres Prof. Olegário Baldo, elaborando um material que comporá um livro didático digital de Matemática Aplicada à Engenharia Florestal, com conteúdos matemáticos que atendam às necessidades das atividades desenvolvidas por empresas da área de Engenharia Florestal na região de Cáceres - MT. Para atingir o resultado, a pesquisa foi desenvolvida em três fases:

Primeira fase – foi marcada por leituras de referências nacionais e internacionais sobre a aplicação da Matemática em diversas áreas e, em especial, na Engenharia Florestal. Também foram entrevistados 07 professores que ministram aulas no curso de Engenharia Florestal do IFMT – Campus Prof. Olegário Baldo, para entender melhor quais são os conteúdos matemáticos necessários à prática do Engenheiro Florestal. As entrevistas foram previamente agendadas e gravadas com autorização dos professores.

Ainda nessa fase, realizaram-se duas entrevistas com Engenheiros Florestais das empresas Teak Resouces Company – TRC (24/02/2023) e Bracell (06/04/2023). Essas entrevistas buscaram compreender como os conteúdos matemáticos estão inseridos nas atividades profissionais do Engenheiro Florestal.

Segunda fase – a equipe analisou, de forma quantitativa e qualitativa, os dados coletados na primeira fase. Em seguida, elaboraram-se propostas de atividades que despertam mais o interesse do graduando para o conteúdo de matemática, priorizando atividades com abordagem práticas, contextualizadas e aplicadas à área da Engenharia Florestal e no desenvolvimento e produção das atividades das empresas, de forma a permitir uma formação mais qualificada aos formandos.

Terceira fase – a partir do resultado da segunda fase, foram selecionadas as atividades que comporão o primeiro capítulo do livro didático digital. Para essa seleção, realizou-se leitura de todas as questões e, quando necessário, fez-se ajustes nos dados. Algumas questões foram reservadas para outros capítulos por não atenderem **à** proposta do capítulo 1 do livro digital. Todas as atividades priorizaram a motivação e o desenvolvimento acadêmico, contribuindo com sua formação e com a preparação para o mercado de trabalho com mais segurança e eficácia.

O material foi divulgado, parcialmente, no WORKIF 2023, e, ao final da elaboração do livro didático, será publicado em formato de livro digital com editorial.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

De forma geral, os professores asseguraram que a base matemática apresentada pelos alunos quando chegam ao curso de Engenharia Florestal é “fraca”, há defasagem em conhecimentos básicos da matemática, tais como: regra de três, porcentagem, aritmética com número racionais, potenciação, dentre outros.

De acordo com os professores, a matemática é fundamental no ensino da área da Engenharia Florestal. Mesmo tendo acesso a softwares avançados, é preciso ter a mínima noção de aritmética e geometria.

Eles apontaram diversos conteúdos matemáticos que utilizam para resolver situações específicas da área de engenharia, sendo os mais citados: equações, regra de três, trigonometria e unidades de medidas (comprimento, massa, tempo, agrárias, área, volume, capacidade e angulares).

Segundo o Engenheiro da TRC, utilizam-se diversos softwares; mesmo assim, em alguns momentos é necessário utilizar cálculo matemático de forma manual. Ele afirma que “o aluno de engenharia precisa ser mais prático e o contato com as empresas é muito importante”. Tal afirmação corrobora a pesquisa que busca elaborar questões matemáticas com aplicação na Engenharia Florestal.

O engenheiro da Bracell também segue na mesma linha, assegurando a importância da matemática na atuação profissional.

A seguir serão apresentadas, como exemplo, duas atividades elaboradas pelos pesquisadores para compor o material didático final.

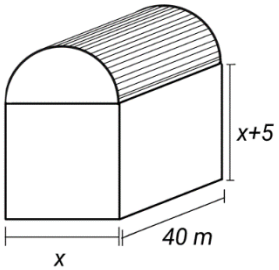
Questão 01: Um engenheiro florestal precisa determinar quanto tempo levará para

um Jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*) atingir metros. Considere que essa espécie de árvore tem uma taxa de crescimento linear de metros a cada dois anos e o tamanho inicial é igual a zero em relação ao solo.

PETRÓPOLIS. Secretaria de Meio Ambiente. Jequitibá-Rosa. Disponível em: https://www.petropolis.rj.gov.br/sma/index.php/mata-atlantica/flora/363-jequitiba-rosa.html. Acesso em: 11 abr. 2023.

a. Quantos anos serão necessários para que a árvore atinja a altura de metros?

b. Considerando uma altura inicial de centímetros, em quantos anos a árvore atingirá 23 metros?



Questão 02: Para armazenar madeiras Jatobá (*Hymenaea courbaril*), uma turma da Engenharia Florestal precisa de informação do espaço de armazenamento da empresa Rústico (Artesanato Rústico). O armazém disponível tem o formato de um paralelepípedo, com o teto na forma semicilíndrica (desconsiderar o volume do teto). Sabe-se que o volume do armazém (na forma de paralelepípedo) é 20 000 m³. A lateral do armazém mede 40 metros e a altura mede 5 metros a mais que a frente.

a. Determine o valor de cada dimensão.

b. Segundo Celso Foelkel, “a unidade de medida estéreo é o volume que se obtém pela medição da pilha de toras de madeira, incluindo os volumes de espaços vazios entre as toras” (Foelkel, 2015, p. 06). Sendo assim, a árvore Jatobá, após seu corte, mede 10 metros. Considerando as dimensões do armazém e seu comprimento alocado paralelo ao solo, qual o volume Estéreo (st) de madeira Jatobá que caberá no armazenamento da empresa Rústico (Artesanato Rústico)?

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em síntese, a matemática é essencial na vida quotidiana e em diversas áreas profissionais, mas muitos estudantes têm dificuldade de aplicar esses conceitos a situações do mundo real. Ao reconhecer essas lacunas, a pesquisa propôs uma abordagem direcionada para fortalecer a compreensão e a aplicação da matemática em disciplinas da área florestal, a fim de melhorar a capacidade dos futuros profissionais e vincular a teoria e a prática.

À medida que o projeto avançou, a pesquisa se concentrou na compreensão de conteúdos matemáticos relevantes para a prática profissional, contribuindo para atingir o objetivo proposto.

Considera-se uma pesquisa de grande valia, pois contribuirá com o processo de ensino e aprendizagem da matemática, por meio de atividades voltadas para a prática profissional. Além disso, ao divulgar o material em eventos do IFMT e realizar publicações em diversos meios (Anais, revistas, livros e outros), a pesquisa beneficiará a missão do IFMT, ampliando sua visibilidade e reforçando seu papel de excelência na educação profissional, de forma a preparar os estudantes para enfrentarem os desafios dessa área – sem contar a contribuição da pesquisa para o ensino de matemática em outras instituições e diversos cursos da área Agrária.

REFERÊNCIAS

DIAS, M. R. de O. **Teoria e prática no ensino da matemática, uma atividade complexa.** 2019. Disponível em: https://www.nucleodoconhecimento.com.br/matematica/pratica-no-ensino#INTRODUCAO . Acesso em: 24 abr. 2022.

FOELKEL, Celso. Medição de madeiras na forma de toras empilhadas. **Eucalyptus On line Book e Newsletter**, nº 48, outubro, 2015.

MIGUEL, I. C.; NATTI, P. L. **Uma proposta de modelagem matemática aplicada à produção da farinha de trigo**. Disponível em: http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/pde/arquivos/1498-8.pdf . Acesso em: 22 abr. 2022.

PETRÓPOLIS. **Secretaria de Meio Ambiente**. Jequitibá-Rosa. Disponível em: https://www.petropolis.rj.gov.br/sma/index.php/mata-atlantica/flora/363-jequitiba-rosa.html. Acesso em: 11 abr. 2023.

CAPÍTULO 23

O ESTUDO DO NEUROMARKETING PARA ELABORAÇÃO DE SITES HOSPITALEIROS

Data de aceite: 01/04/2024

Cristina Quitéria de Brito

RESUMO: A hospitalidade virtual é o tema a ser pesquisado dentro deste trabalho. O interesse pelo campo virtual surgiu face à importância que as pessoas passaram a dar para este ambiente como meio de realização de contatos pessoais e realização de negócios empresariais, o que torna os sites de compras o objeto da pesquisa. Diante dos caminhos que poderiam ser percorridos, a escolha pela hospitalidade foi o ponto de partida para a investigação acadêmica por se mostrar uma área com grande campo de exploração. Com o objetivo de identificar o que um site precisa ter para ser considerado um hospitaleiro, utilizou-se para o referencial teórico autores da área da hospitalidade e do ambiente virtual e do neuromarketing. Os procedimentos metodológicos realizados basearam-se em pesquisa bibliográfica sobre o tema. Verificou-se que as ferramentas utilizadas no neuromarketing podem contribuir na construção de sites hospitaleiros.

A HOSPITALIDADE GENUÍNA

> *Não vos esqueçais a hospitalidade, pela qual alguns, sem o saberem, hospedaram anjos.*
>
> *(HEBREUS 13:2)*

A epígrafe acima transcrita da Bíblia nos possibilita evidenciar o dever moral, a perspectiva religiosa com suas escrituras demonstrando que oferecer hospitalidade ao estranho era uma exigência básica, assim como afirma Camargo (2011, p.13) que a hospitalidade expressa uma qualidade desejável da qual as religiões se tornam as grandes apregoadoras.

Uma reflexão sobre o sentido da hospitalidade, pode trazer, à priori, sua noção do senso comum, ao que estamos acostumados a ouvir sem dar muita importância ao verdadeiro significado, mas é preciso prosseguir com esta reflexão para abrirmos os horizontes e descobrirmos sua noção através do sentido filosófico e social desta palavra.

A hospitalidade é para o filósofo Jacques Derrida (1999) é incondicional e designa a obrigação de oferecer hospitalidade sem restrições a quem quer que a demande. Esta obrigação faz da hospitalidade uma lei que não está escrita em lugar algum e nem se faz necessária a criação de manuais, normas ou códigos formais como registros em determinado local como forma de provar e assegurar que esta lei da hospitalidade será disseminada. A hospitalidade vai além, transcende a cultura. Oferecer hospitalidade incondicionalmente a quem quer que seja, um dever, a tríade do "dar, receber e retribuir" (MAUSS, 1974). A dádiva é o significado de hospitalidade e o autor compara a hospitalidade a um presente que deve ser oferecido sem esperar retribuição, mas como receber um presente e não se sentir o desejo de retribuir? Até as crianças, em sua inocência, retribuem os presentes. Para Camargo (2004) a retribuição é a aceitação da dádiva e esta não é um ato isolado, eis sua grande descoberta. Inscreve-se num processo que compreende três momentos que se repetem indefinidamente: dar, receber e retribuir.

Busca-se com a dádiva o estreitamento das relações e por mais que o "dar" não obrigue o "receber" juntamente com o retribuir são constantes como descreveu Camargo no texto acima.

Neste momento, cabe aqui evidenciar a definição dada por Alain Caillé (2002 apud CAMARGO) para a dádiva, sendo esta mais do que um dom, um signo, é prestar um serviço (ou bem) sem a garantia de que será retribuído, mas sim, apenas com a intenção de estabelecer, manter ou reconstruir um vínculo social.

Para se estabelecer o vínculo social é preciso que ocorra a real hospitalidade com todas as características que descreve Camargo (2015) para situações de hospitalidade, como uma cena, com dois atores centrais, individuas ou coletivos, o anfitrião e o outro o hóspede, mas para dar início à cena é preciso aguardar a permissão de entrada para transpor a soleira da "porta".

A hospitalidade é sinal de civilização e humanidade [...] é uma maneira de viver em conjunto, regida por regras, ritos e leis (MONTANDON, 2011, p. 31).

Tudo começa na soleira, naquela porta à qual se bate e que vai ser aberta para um rosto desconhecido, estranho. Limite entre dois mundos, entre o exterior e o interior, o dentro e o fora, a soleira é a etapa decisiva, semelhante a uma iniciação (MONTANDON, 2011, p. 32).

Um convite ou um pedido de entrada, seja qual for o ato, é preciso passar a barreira e para esta passagem é preciso a autorização, o gesto de aceitação, a permissão para que o outro possa entrar, é o encontro entre o anfitrião e o hóspede.

O contato com o estranho, seja qual for o lugar, gesto da permissão dá a oportunidade de passar a soleira, a marca, a delimitação dos mundos entre o anfitrião e o hóspede, mas a não permissão pode gerar a inospitalidade, contrária a hospitalidade, mas caminham juntas, sendo que a manifestação de uma ou de outra dependerá da aceitação ou negação, dos acontecimentos presentes na cena hospitaleira.

A hospitalidade, mais do que um fato observável, é uma virtude que se espera quando nos defrontamos com o estranho (e todo estranho é também um estrangeiro), alguém que ainda não é, mas *deve* ser reconhecido como o outro. Tudo se passa como se o sentido mais importante da noção seja perguntar-se se esse encontro resultou em estreitamento ou esgarçamento do vínculo social de início buscado (CAMARGO, 2015).

A hospitalidade é a troca das relações interpessoais, é a importância, a preocupação com outro.

Boff (2005, p. 94) compartilha do mesmo pensamento de que a hospitalidade se define a partir do outro:

> [...] é antes de mais nada uma disposição da alma aberta e irrestrita. Ela, como o amor incondicional, em princípio, não rejeita, nem discrimina a ninguém. É, simultaneamente, uma utopia e uma prática. Como utopia representa um dos anseios mais caros da história humana: de ser sempre acolhido independente de condição social e moral e de ser tratado humanamente. Como prática criam as políticas que viabilizam e ordenam a acolhida. Mas por ser concreta sofre os constrangimentos e as limitações das situações dadas.

Para Baptista (2002), a hospitalidade pode dizer-se e manifestar-se por meio de muitas maneiras: pelas palavras, pelos gestos, pelas leis e pela pluralidade imensa de formas de gerir os tempos e os espaços que nos coube viver.

As pessoas genuinamente hospitaleiras possuem a afabilidade no trato, no contato com o outro. A hospitalidade nos ensina a respeitar e a acolher o outro de uma forma incondicional e verdadeira.

A Hospitalidade Comercial

A hospitalidade outrora vista como um ato de obrigação ligada à perspectiva religiosa, forma universal ligada aos Deuses, nos últimos anos, ganha novas roupagens e pode ser inserida no ambiente comercial como forma de estratégia competitiva.

Para Lashley (2004) a hospitalidade acontece nos domínios privado, social e comercial. No domínio privado encontramos a cena hospitaleira no lar, onde a morada pode ser ofertada para o desconhecido, o anfitrião oferece o que tem de melhor para seu hóspede. O estudo do domínio social da hospitalidade proporciona interessantes perspectivas teóricas através das quais se estabelece o entendimento das atividades que abrangem a indústria da hospitalidade (Lashley, 2004, p. 13).

Será no espaço comercial que nos permitiremos uma maior aproximação, pois é neste domínio que ocorre a troca monetária, o que pode tornar a hospitalidade, na visão de alguns estudiosos, como uma hospitalidade falsa, encenada, passa de incondicional e genuína para uma prática de hospitalidade de interesse financeiro?

Traremos o termo hospitalidade utilizada por Telfer (2004) para descrever a característica de uma pessoa hospitaleira, uma virtude, "um meio, entre outros, pelo qual alguém pode escolher exercer diversas virtudes mais gerais: benevolência, zelo pelo bem estar público, compaixão, afetividade" (TELFER, 2004, p.76).

Telfer (2004) nos remete a pensar na virtude como disposição constante do espírito que algumas pessoas possuem em demasia. Para a autora:

> Dizer que não se pode considerar que um hospedeiro comercial se comporta com hospitalidade só pelo fato de ser pago pelo seu trabalho como não se pode considerar que um médico apenas se comporta com compaixão porque ele é pago pelo serviço que presta. Ambos podem ter escolhido essa profissão apenas pelo trabalho que prestam (TELFER, 2004, p. 63).

Assim a autora nos diz que não podemos tratar a hospitalidade comercial como uma troca ou um contrato em que a questão monetária seja sua única e verdadeira intenção.

Para Lugosi (2008), o espaço criado e as atitudes hospitaleiras e não apenas o serviço oferecido em si são a marca, a virtude do anfitrião comercial hospitaleiro.

Mesmo em ambiente comercial em que há uma relação de interesse material, se a hospitalidade se manifestar em sua forma genuína, a preocupação com o outro emergir, gestos de afetividade, podemos falar em hospitalidade como virtude como observa Gotman (2009):

> Na esfera comercial, "fazer sempre mais" pelo cliente é tentar capturá-lo, mas também realça o prestígio do estabelecimento anfitrião. Essa obrigação de excelência, de ***"plus",*** que recomenda ir além da simples equivalência qualidade-preço, já vimos, é uma característica da dádiva em virtude da qual não basta simplesmente dar conta dos deveres, mas fazer mais, fazer um sacrifício, e assim marcar claramente a ausência de hostilidade. (GOTMAN, 2009, p. 12-13).

Gotman ao falar do sacrifício que o anfitrião deve realizar para que o cliente possa perceber que foi tratado como alguém que, a princípio, é sempre visto apenas como "mais um", o estranho, mas consegue sentir esse tratamento especial e a importância que lhe é dada, que foi reconhecido como o outro, o sacrifício mostra a diferenciação que tanto se espera no ambiente comercial. Com o mesmo pensamento (Celine Pérol, 2011, p. 1251) afirma que a hospitalidade e o comércio, este compreendido como uma atividade mercantil são praticados em todas as civilizações e se impõem como dois princípios fundamentais das relações humanas e das trocas. Para a autora as motivações de ordem espiritual e material podem, portanto, coexistir e se manifestar em uma mesma época, recolocando em sua causa, dessa maneira, as teorias de uma evolução linear da hospitalidade.

Os clientes querem, ao mesmo tempo, as garantias e a padronização das grandes marcas, mas também anseiam pelo toque pessoal e de humanidade típicos das expressões de hospitalidade. Querem encontrar serviços produzidos em massa que, ao mesmo tempo, os reconhecem como indivíduos dotados de necessidades únicas (SPOLON, LASHLEY, 2011).

O AMBIENTE VIRTUAL

A hospitalidade vista no ambiente privado, social e comercial durante muito tempo continua a mesma hospitalidade, pois esta não muda, ganha novas lentes, novos ambientes e passa a ser vista no ambiente virtual, termo utilizado, pela primeira vez, por Luiz Octávio de Lima Camargo no livro Hospitalidade: Cenários e Oportunidades, lançado em 2003. Camargo descreve as 4 categorias da hospitalidade: doméstica, pública, comercial e virtual e com relação a esta descreve:

> Virtual – embora perpasse e seja quase sempre associada espacialmente às três estâncias anteriores, já se vislumbram características específicas dessa hospitalidade, notadamente a ubiquidade, na qual receptor e emissor da mensagem são respectivamente anfitrião e visitante, com todas as consequências que essa relação implica.

É através da característica da ubiquidade que um contato onipresente no ambiente virtual se faz possível. Neste espaço, as pessoas entram, permanecem o tempo que julgam ser necessário e saem. É pela assincronicidade que este ambiente permite aos seus atores não estarem presentes, simultaneamente, na maioria das vezes, fato este que não diminui as consequências presentes na hospitalidade como descreve Camargo no texto acima e com todas as consequências que essa relação implica presentes neste cenário do mundo virtual. As cenas continuam com seus protagonistas, aquele que recebe e aquele que é recebido, o anfitrião e o hóspede, o estranho, que se espera que se torne o outro.

Gotman (2013), acompanha o pensamento de Camargo (2003) sobre o reconhecimento do ambiente virtual ao referir-se à hospitalidade doméstica que desde o início da Modernidade vem sendo paulatinamente substituída pela hospitalidade urbana e virtual, mas permanece como a matriz de qualquer forma de relação interpessoal" [...]". Não desaparecem os rituais de hospitalidade, nem os códigos sobre os quais estes repousam; mudaram, simplesmente.

A modernidade trouxe inúmeras inovações, o que muitos chamam de a Era da informação. Além dessa alteração de cenários, houve também uma perceptível mudança na hora de se transmitir a mensagem. As formas de comunicação baseadas em meios somente textual deram vez às cores, às formas, às figuras, imagens e apresentações multimídias.

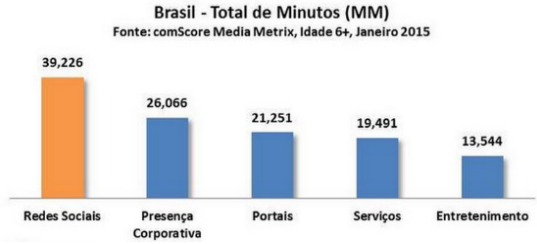
Na comunicação virtual, uma comunicação realizada, muitas vezes, por técnicas audiovisuais como menciona Leroi-Gourha (1962) ao dizer que, curiosamente, podemos interrogar-nos se as técnicas audiovisuais alteram realmente o comportamento tradicional dos Antropídeos. E também nos podemos interrogar acerca de qual será o destino da escrita num futuro mais ou menos longínquo (Leroi-Gourha, 1962).

Para a comunicação no ambiente virtual é necessária a utilização de um computador possibilitando e, principalmente, intermediando relações de hospitalidade. Como menciona Gotman (2001, p. 493) ao dizer que a hospitalidade é um processo de agregação do outro à comunidade. No ambiente virtual o "receber" o hóspede significa eliminar todas as restrições para sua entrada e tentar garantir sua permanência.

SITES DE COMPRA

A cada dia cresce o número de pessoas que utilizam a internet. Esse ambiente apresentou-se como um novo veículo de comunicação graças a possibilidade de volume e imediatismo das informações. Segundo dados do Comitê Geral da Internet (CGI), em pesquisa realizada no ano de 2013 constatou-se que, pela primeira vez, o crescimento na proporção de domicílios conectados à internet de usuários da rede ultrapassou metade da população.

O portal da ComScore.com, uma empresa de pesquisa de mercado que fornece dados de marketing e serviços para muitas empresas da internet, divulgou a pesquisa realizada no primeiro semestre de 2015 onde os dados permitem visualizar que o tempo de navegação na internet é de 39 minutos, em média, em redes sociais, tempo que pode ser percebido junto aos demais no gráfico abaixo:



Fonte: Portal ComScore.com

A internet com suas redes sociais e seus sites de entretenimento proporcionam tempo de lazer necessário para os usuários que procuram a rede com esta finalidade, assim, Dumazedier (1973) define o lazer como sendo um conjunto de atividades às quais o indivíduo pode entregar-se de livre e espontânea vontade seja para repousar ou ainda para desenvolver sua participação voluntária ou sua livre capacidade criadora após desembaraçar-se de suas obrigações familiares, profissionais ou sociais.

As redes sociais funcionam como forma de interação, proximidade entre as pessoas, incluindo a possibilidade de compartilharem documentos, fotos, imagens, ou seja, um ambiente também considerado de diversão como Camargo (1998) descreve a diversão e o lúdico são traços de todas as sociedades conhecidas, em todas as épocas da história; já o tempo livre é uma conquista moderna, sendo ele o tempo que sobra das obrigações profissionais, escolares e familiares, e lazer é a forma mais buscada de ocupação deste tempo livre, seja para diversão, seja para autodesenvolver-se por meio de conversas, da leitura, do esporte etc. (CAMARGO, 1998).

Diante do crescente número de pessoas conectadas às redes sociais, as empresas não poderiam ficar de fora desse mercado que é considerado um meio de comunicação com seus atuais clientes e com os clientes em potencial, principalmente, para transações comerciais de seus produtos e serviços.

Além da utilização da internet para realização de compras, tarefa esta que faz parte da atividade humana é também uma maneira alternativa aos canais tradicionais, para pesquisar produtos e realizar compras diretamente em lojas físicas. Essa forma de comercialização também é conhecida como comércio eletrônico ou e-commerce, um meio de permitir e dar suporte à troca de informações, bens e serviços entre empresas ou entre empresas e seus clientes. A internet possibilita agilidade e baixo custo na procura de produtos e serviços.

Os sites permitem que as empresas sejam mais eficientes em suas operações internas e mais sensíveis às necessidades e expectativas de seus clientes. As tecnologias do e-commerce permitem que as empresas troquem informações instantaneamente, eliminem a burocracia e anunciem seus produtos e serviços a um mercado global (GANGWANI, 2000, p.10).

“A compra é o momento de troca de valor, quando duas partes negociam a satisfação de suas expectativas. Esse ponto implica que a situação presente das duas partes é o fator que determina o modo de compra“. As empresas de varejo devem trazer o atendimento como principal foco de atenção para se destacar junto ao consumidor (GIGLIO, 1996, p. 156).

Para se falar em sites de compra por uma perspectiva mais profunda e estudada se faz necessária a leitura do artigo Design de lojas de Varejo na Internet escrito em 1999 por Gerald L. Lohse e Peter Spiller que deu início às pesquisas sobre a aparência de sites de compras nos Estados Unidos e serviu para vários outros estudos. Os autores realizaram uma analogia entre lojas físicas e lojas on-line para demonstrar como estes ambientes podem ter ligação:

Lojas de Varejo Físicas	Lojas de Varejo On-line
Vendedor	Informações sobre os produtos, serviços, funções de busca, carrinho de compras, contato telefônico ou e-mail.

Promoções	Promoções, entretenimento, pontuações
Vitrine	Página inicial
Ambiente	Interface gráfica, organização, layout
Produtos de corredor	Produtos em destaque
Layout/ Design	Design da página, navegação, funções de pesquisa, índices e mapas do site
Quantidades de andares	Níveis hierárquicos dos produtos
Quantidades de lojas	Links com outras lojas
Caixa	Carrinho de Compras/ Formulário de Pedidos
Contato físico dos produtos	Qualidade das imagens, descrições, som e vídeo
Circulação de pessoas	Número de visitas
Vendas por período	Vendas por período

Tabela1: Analogia entre lojas de varejo física e lojas de varejo on-line (Spiller and Lohse, 1999)

Neste mesmo estudo, onde 28 lojas da internet foram analisadas e os resultados demonstraram que os fatores como: merchandising, serviço, promoção, navegação e comunidades são determinantes para a elaboração de sites para comercialização de produtos.

A experiência de compra do cliente em ambiente virtual possui três fatores de influência (CONSTANTINIDES, 2004):

Fatores de funcionalidade do ambiente virtual: relacionados à usabilidade e à interatividade do ambiente virtual fornecido pela empresa. Velocidade de navegação, arquitetura da informação, customização do site e interação com pessoas da empresa e efeitos de rede são fatores que pesam na avaliação do consumidor. Consumidores tendem a passar mais tempo em experiências virtuais quando há maior interatividade, preferindo situações em que há maior sensação de presença virtual (Rafaeli e Noy, 2002).

Fatores psicológicos: Destaca-se a confiança do consumidor. Transações on-line são avaliadas como de maior risco de fraude, portanto é de alta importância oferecer (e fazer com que pareça) um ambiente seguro. O risco é um dos fatores que influencia a decisão de realizar ou não a compra.

Fatores de conteúdo: ferramentas que influenciam a decisão do consumidor: mix de marketing e atributos sensoriais do conteúdo: design e qualidade da apresentação (CONSTANTINIDES, 2004).

A decisão de compra também está relacionada ao prazer proporcionado durante a experiência no canal virtual (Suzi e Suzi, 2007).

As pessoas, ao entrarem nos diversos sites da internet, procuram diversos tipos de informação e as empresas precisam dispor seus conteúdos de formas diversas e criativas.

O crescente número de sites e sua multiplicidade de aparência exige cada vez mais que se busque maneiras da comunicação virtual, o que torna imprescindível aumentar o debate sobre este campo e buscar ferramentas que possam ser utilizadas.

NEUROMARKETING

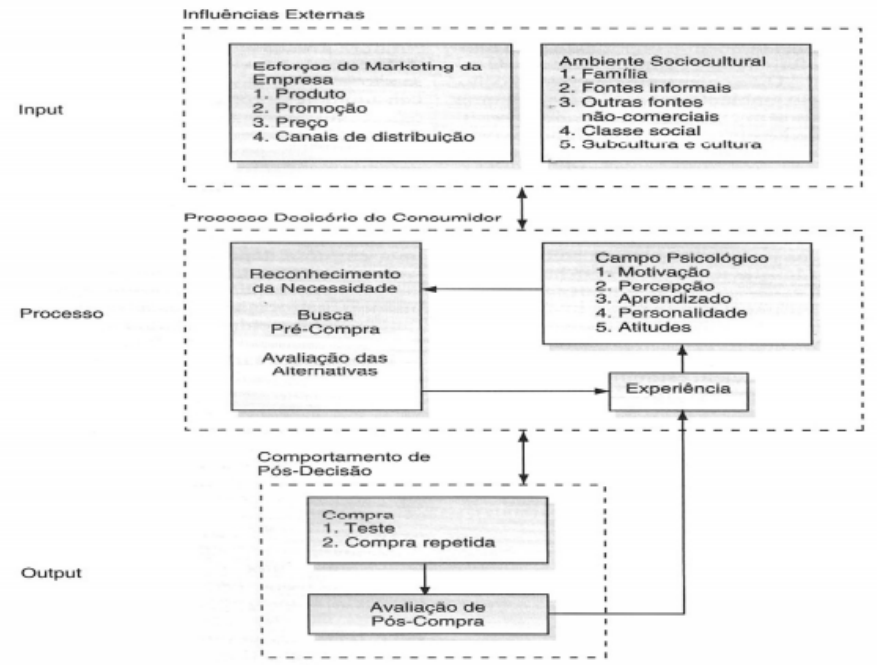
Em um ambiente cada vez mais competitivo, as empresas buscam novas formas de agir, elaborar estratégias com o intuito de conquistar o cliente que também acompanhou as mudanças e a passou a se colocar em um nível de maior de complexibilidade de entendimento. O cliente vem mudando seu perfil, considerado como um agente passivo passou a ganhar informações, adquiriu conhecimentos e passou a ser mais crítico e mais exigente. Face a essas mudanças, o mercado procurou estudar as diversas variáveis que influenciam nesta relação entre cliente e empresa. Atributos que antes serviam para a tomada de decisões estratégicas para a criação de produtos e serviços como idade, sexo, classe social, não estão apresentando os mesmos resultados do passado.

As pesquisas com entrevistas realizadas com o objetivo de descobrir a opinião, gostos e preferências dos consumidores apresentam críticas quanto ao modo de aplicação como menciona Malhotra (2011, p.136), na entrevista direta, o entrevistado pode, de maneira intencional ou não, compreender mal, interpretar mal ou enganar o pesquisar.

Além de ferramentas mais eficientes que identifiquem de modo mais eficiente o comportamento do perfil do novo consumidor, há uma necessidade ainda maior e fundamental de discutir essas mudanças de comportamento que vem ganhando força desde os anos de 1990, quando os clientes perceberam que podiam valer seus direitos (POON; PRENDERGAST, 2006).

O estudo do comportamento do consumidor tem grande abrangência e interesse por parte das empresas, mas também tem sua importância para os acadêmicos de diversas áreas de estudos como descreve Schiffman e Kanuk (2000) sobre a interdisciplinaridade do estudo do comportamento do consumidor, pois baseia-se nos conceitos e teorias acerca das pessoas, desenvolvidos por cientistas em disciplinas tão diversas quanto a psicologia, a sociologia, a psicologia social, a antropologia cultural e econômica.

A figura abaixo demonstra o processo de tomada de decisão do consumidor:



Fonte: Schiffman e Kanuk (1997)

Diversas abordagens para compreender os fenômenos humanos e sociais têm sido desenvolvidas, seja fundamentando-se na observação (na sociologia e na microeconomia), experimentação (a exemplo do behaviorismo) ou introspecção e reflexão (psicanálise). O marketing, enquanto uma disciplina constituída na pluralidade de domínios e conceitos vivencia este desafio de forma ampla e abrangente (Achrol & Kotler, 2011). Neste sentido buscou-se nas ciências funcionais, anatômicas e comportamentais formas de avaliar o comportamento humano. A essas ciências coube o uso da tecnologia para desenvolver novos dispositivos, equipamentos, métodos e técnicas não invasivas e avanços em processamento de imagens para possibilitaram novos espaços de estudos neurocientíficos (Farah, 2011).

Deste modo, Achrol e Kotlher (2011) sugerem que a aplicação da neurociência ao marketing é um sintoma de uma forma renovada de compreensão dos fenômenos mercadológicos, ou como citam, são evidências de um “paradigma emergente” para a disciplina.

O neuromarketing é definido como um novo campo de pesquisa que estuda respostas cognitivas e afetivas dos consumidores a diferentes estímulos de marketing. Seu objetivo é desvendar os mecanismos inconscientes que regem as decisões dos clientes (DOOLEY, 2012).

O neuromarketing vem sendo muito difundido no Brasil e no mundo, mas sua aplicação nas pesquisas de marketing ainda é considerada baixa. Como menciona o professor de psiquiatria da Universidade de São Paulo (USP) em seu artigo Neuromarketing integrativo publicado em 2012, sobre o grande número de pessoas que procuram tirar alguma vantagem falando sobre o neuromarketing, mas poucos sabem programar e produzir experimentos nessa área; diversas noções equivocadas – e outras parcialmente corretas, mas notoriamente irrefletidas – são disseminadas, enfraquecendo a imagem e seriedade da técnica. (DIAS, 2012).

A Jerry Zaltman é creditada a criação do conceito de neuromarketing, que no final da década de noventa conduziu o caráter estratégico da utilização de neuroimagem funcional para refinamento da oferta de produtos, e foi introduzido no mercado em 2001 pela empresa de comunicação americana BrightHouse (Wilson, Gaines & Hill, 2008).

As pesquisas em neuromarketing são baseadas nos achados da neurociência e técnicas que desvendam os mecanismos cognitivos e afetivos que regem as decisões de compra. Além das técnicas da neurociência e seus achados, os estímulos cerebrais fornecem, aos anunciantes, oportunidades para melhor atrair a atenção dos clientes para a realização da compra. O neuromarketing tem uma ação direta sobre o cérebro humano (WILLIANS, 2007).

O neuromarketing possui vários aparelhos para investigar o comportamento do consumidor, entre elas o eye trackers que realiza a captura o local onde o olho de uma pessoa foca a sua atenção na tela de um computador e este pode contribuir para a construção de sites hospitaleiros, assunto a ser tratado nos próximos estudos.

REFERÊNCIAS

ACHROL, R.S., KOTLER, P. Frontiers of the marketing paradigma in the third millennium. Journal of the Academy of Marketing Science, 35-42, 2011.

BAPTISTA, I. Para uma geografia de proximidade humana. Revista Hospitalidade, v.2. São Paulo, 2005.

BOFF, L. Virtudes para um outro mundo possível: hospitalidade. Petrópolis: Vozes, 2005.

BROTHERTON, Bob; WOODS, Roy C. Hospitalidade e administração da hospitalidade. In: LASHLEY, Conrad; MORRISON, Alison. Em busca da hospitalidade: perspectivas para um mundo globalizado. São Paulo: Manole, 2004, p.191-222.

CALHOUN, Craig. O papel das Ciências Sociais em um mundo em mudança acelerada. Revista FAPESP, ago/2014.

CAMARGO, L.O.L. Os domínios da hospitalidade. In: DECKER, Ada de Freitas Maneti; BUENO Marielys Siqueira. Hospitalidade: cenários e oportunidades. São Paulo: Pioneira, 2003, p. 7-14.

_____ Hospitalidade, São Paulo: Editora Aleph, 2004.

_____ Os interstícios da Hospitalidade. Revista Hospitalidade. São Paulo, ano XII, p. 42-70, maio. 2015.

CASTELLS, M. A era da informação: economia, sociedade e cultura;. São Paulo: Paz e Terra, 1999.

COMSCORE – Top 10 Estatísticas que mostram como a economia, política, mobile e entretenimento podem modificar o consumo de internet no Brasil. Disponível em: <http://www.comscore.com>. Acesso em: 26 de setembro de 2015.

COLAFERRO, C; CRESCITELLI, E. A contribuição do neuromarketing para o estudo do comportamento do consumidor. Brazilian Business Review, v.11, n.3, pp.130-153, 2014. Disponível em: < http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/12/12139/tde-27012012-185906/en.php>. Acesso em: 24 out. 2015.

GANGWANI, N; SANGEETA, G. Soluções de e-commerce para negócios sem limites. São Paulo: K. R. / Microsoft Press, 2000.

GIGLIO, E. Comportamento do consumidor e a gerência de marketing. São Paulo: Pioneira, 1996.

GOTMAN, A. O comércio da hospitalidade é possível? Revista Hospitalidade, 6, 3-27, 2009

_____, Anne. Entrevista a Marie Raynal. Revista Hospitalidade, v. X, no 1, p. 146-157, 2013.

LA CASA, A. Marketing Interativo: utilização de ferramentas e mídias digitais. São Paulo: Saint Paul, 2010.

LASHLEY, Conrad; SPOLON, A.P. Administração de Pequenos Negócios de Hospitalidade. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

Leroi-Gourhan, A. A Liberdade Imaginária e o Destino do Homo Sapiens. Capítulo de conclusão dos 2 volumes. O gesto e a palavra. Lisboa, Ed.70, s/d Original de 1962.

LOBNA, N. Neuroscience techniques and the priming processes significance to neuromarketing advertising. European Scientific Journal, v.1, n.1, pp.255-267, 2014. Disponível em: <http://eujournal.org/index.php/esj/article/view/3643> Acesso em: 09 dez. 2015.

LUGOSI, Peter. From food, work and organization to the study of hospitality and organization: reconsidering the special issue of Human Relations. Hospitality & Society 1(1), 61: 7, p. 85-89, 2008.

MALHOTRA, N. K. Pesquisa de marketing: foco na decisão. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

Maffesoli, NilmaMorcerf de Paula, Rita de Cássia Ariza da Cruz Zilda Maria Matheus. EditoraManole, São Paulo, 2002.

MAUSS, Marcel. Ensaio sobre a dádiva. Lisboa – Portugal: Edições 70, 2001.

MONTANDON, Alain. O estudo da hospitalidade. In: LASHLEY, C.; MORRISON, A (org.). Em busca da hospitalidade: perspectivas para um mundo globalizado. São Paulo: Manole, 2004, p. 53-72.

_____. O livro da hospitalidade (org). São Paulo: SENAC, 2011.

Nielsen, Jakob. Usability Engineering. San Diego: Academic Press, 1993. ROWLEY, J. Product search in e-shopping: a review and research propositions. JournalofConsumer Marketing, v. 17, n.1, p. 20-35, 2000.

POON, D. T. Y.; PRENDERGAST, G. A new framework for evaluating sponsorship opportunities. International Journal of Advertising, v. 25, n. 4, 2006.

SANTOS, M.; GONÇALVES, C.; MONTEIRO, P; FILHO, CID. Refletindo sobre a ética na prática do neuromarketing: a neuroética. Revista Brasileira de Marketing, v. 13, n. 3, 2014.

SCHIFFMAN, L. G.; KANUK, L. L. Comportamento do consumidor. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2000.

SILVANA F. e VIEIRA F. Hospitalidade, turismo e estratégias segmentadas. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

TAPSCOTT, D.; TICCOLL D. e LOWY . A. Capital Digital: Dominando o Poder das Redes de Negócios. São Paulo: Makron Books, 2001.

TELFER, E. A filosofia da “hospitalidade”. In: LASHLEY, C.; MORRISON, A (org.). Em busca da hospitalidade: perspectivas para um mundo globalizado. São Paulo: Manole, 2004, p. 53-72.

TURBAN, E, KING D.; Comércio Eletrônico: estratégia e gestão. São Paulo: Pearson, 2004.

CAPÍTULO 24

PREPARAÇÃO DE FILMES DE ALGINATO DE SÓDIO E EXTRATO DE KALANCHOE CRENATA (ANDREWS) HAW (SAIÃO) PARA APLICAÇÃO COMO CURATIVO CICATRIZANTE

Data de submissão: 05/02/2024 *Data de aceite: 01/04/2024*

Marisa Cristina Guimarães Rocha
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico
Nova Friburgo – Rio de Janeiro, Brasil
https://orcid.org/0000-0002-1544-729X

Joaquim Teixeira de Assis
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico
Nova Friburgo - Rio de Janeiro, Brasil
https://orcid.org/0000-0002-1544-729X

Nancy Isabel Alvarez Acevedo
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico
Nova Friburgo - Rio de Janeiro, Brasil
https://orcid.org/0000-0002-0475-3240

Ana Angélica Monteiro de Barros
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Formação de Professores
São Gonçalo - Rio de Janeiro, Brasil
https://orcid.org/0000-0002-1369-3462

RESUMO:O alginato de sódio é um dos biopolímeros mais usados para produção de curativos antimicrobianos. O “saião”, identificado como *Kalanchoe crenata (Andrews) Haw*, (Kc) é uma suculenta comercializada na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, com propriedades cicatrizantes e emolientes. Esse estudo apresenta resultados preliminares obtidos no desenvolvimento de filmes de alginato e na preparação do extrato de saião, visando o desenvolvimento de curativos antimicrobianos de baixo custo. Análise de espectros FTIR apresentou bandas características do alginato e a presença de flavonóides, componentes com propriedades anti-inflamatórias, na estrutura do pó (p-Kc) e no extrato (E-Kc). Análise TGA mostra que o comportamento térmico desses materiais é compatível com os apresentados na literatura. A análise granulométrica caracteriza o p-Kc como um material moderadamente grosso, o que facilita a ação do solvente na preparação do extrato. A perda por dessecação do E-Kc calculada está de acordo com as recomendações da farmacopeia (máximo 14%). O rendimento total do extrato foi de 2,4%., valor comumente achado para suculentas. A espessura e as propriedades mecânicas dos filmes curados apresentaram valores concordantes com os exigidos para um curativo.

PALAVRAS-CHAVE: Curativos cicatrizantes, Alginatos, Extrato vegetal, *Kalanchoe crenata (Andrews)Haw*.

PREPARATION OF SODIUM ALGINATE FILMS AND KALANCHOE CRENATA (ANDREWS) HAW (SAIÃO) EXTRACT FOR APPLICATION AS A HEALING DRESSING

ABSTRACT: Sodium alginate is one of the most widely used biopolymers for the manufacture of antimicrobial dressings. The “saião”, identified as *Kalanchoe crenata (Andrews) Haw*, (Kc), is a succulent sold in the mountainous region of the state of Rio de Janeiro with healing and emollient properties. This study presents preliminary results obtained from the development of alginate films and the preparation of extract from Kc leaves with the aim of developing low-cost antimicrobial dressings. FTIR analysis showed the characteristic bands of alginates and the presence of flavonoids,component with anti-inflammatory properties, in the structure of the powder (p-Kc) and extract (E-Kc) of Kc. TGA analysis showed that the thermal behavior of these materials was compatible with that presented in the literature. Particle size analysis characterizes p-KC as moderately coarse, which facilitates the action of the solvent in preparing the extract. The calculated loss on desiccation of E-cK is in accordance with the recommendations of the pharmacopoeia (maximum 14%). The total yield of the extract was 2.4%, value commonly found for succulents. The thickness and mechanical properties of the cur
ed films showed values in line with those required for a dressing.
KEYWORDS: Healing dressings, Alginates, Plant extract, *Kalanchoe crenata (Andrews) Haw*.

INTRODUÇÃO

Curativos a base de produtos naturais com atividade antimicrobiana são considerados uma alternativa terapêutica eficaz para o tratamento de feridas crônicas, infectadas ou com perda parcial de tecido. Alginato de sódio é um dos biopolímeros mais usados nesses curativos. Filmes desse polímero contendo extratos de plantas medicinais vem sendo estudados como alternativa ao uso de antimicrobianos sintéticos que podem promover o desenvolvimento de bactérias resistentes aos antibióticos (Rodrigues *et al.,* 2020; Bueno, 2019; Amutha, 2017; Gomes, 2016; Pereira *et al*., 2013a; Pereira *et al*, 2013b).

As diversas opções de curativos comercializados com propriedades antimicrobianas apresentam em geral custo elevado. Há, portanto, necessidade de se produzir curativos de baixo custo, com eficiência igual ou superior para o tratamento de feridas e que possam ser acessíveis à população de baixa renda. O “saião”, é uma planta comercializada na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, muito utilizada na medicina popular brasileira por suas propriedades cicatrizantes e emolientes (Fonseca, 2005; GreenMe, 2017; Ribeiro, 2010, p. 87; *Medeiros et al*., 2004). De nome científico *Kalanchoe crenata (Andrews) Haw,* o saião pertence à família *Crassulaceae* (Goebel *et al*. 2024; GBIF, 2024), sendo uma suculenta naturalizada no Brasil, de fácil cultivo e de fácil reprodução. Diversos estudos comprovam as propriedades anti-inflamatórias, antioxidantes, antimicrobianas, antitumorais e analgésicas dos extratos obtidos das folhas e/ou partes aéreas da planta (De Araújo *et al.,* 2019; Akinsulire *et al*., 2007). Não há estudos, entretanto, em relação ao potencial cicatrizante da *Kalanchoe crenata (Andrews) Haw,* (Kc), nem à incorporação de nenhum tipo de *Kalanchoe* em filmes cicatrizantes de alginato.

Este trabalho é parte de um projeto envolvendo o desenvolvimento de filmes de alginato contendo extrato de Kc para aplicação como curativo cicatrizante. Há possibilidades de que a incorporação do extrato das folhas de *Kalanchoe crenata* nos curativos de alginato possa promover a obtenção de um produto mais barato, mais eficaz e mais amigável ao ambiente. Deve-se ressaltar que o processo de obtenção do extrato de folhas da planta é simples e sustentável. Pretende-se assim contribuir ao desenvolvimento de maiores estudos sobre a *Kalanchoe crenata (Andrews) Haw,* que levem a sua validação pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA e a estimular seu cultivo e comercialização.

MATERIAISE MÉTODOS

Materiais

Os materiais utilizados nos experimentos foram: alginato de sódio (Na-Alg) em pó, de cor castanho amarelado pálido, massa molecular de 216.000 g/mol,de média viscosidade, 2000 cP, e pH de 6,5-8,5, propriedades determinadas em solução aquosa 2% a 25 °C; cloreto de cálcio ($CaCl_2$) dihidratado, em pó, utilizado como agente de reticulação; e álcool etílico, 99,5%, PA, usado como solvente, fornecidos pela Atriom Produtos Químicos(SP); eglicerol, PA, Vetec, utilizado como agente plastificante, fornecido pela Sigma Aldrich Brasil Ltda(SP). As folhas de saião (*Kalanchoe crenata* (*Andrews) Haw*, Kc) foram doadas por parceiro do projeto, proprietário do sitio Pedra Vermelha,situado a 634 msnm, entre as coordenadas-22,319446 S e -42,300618 W.,Estrada Pedra Vermelha, Boa Esperanza de Cima, distrito de Lumiar, município de Nova Friburgo, RJ.

Identificação da matéria prima-vegetal.

Para fins de registro na coleção científica, amostras férteis da planta saião foram coletadas em agosto de 2021 seguindo as técnicas usuais em botânica (Peixoto, Maia, 2013). Entende-se por amostras férteis aquelas que estejam com flores e/o frutos, Fig. 1. Na coleta usou-se tesoura de poda e sacos plásticos para armazenamento das amostras. Dados como habitat, tamanho da planta, consistência das folhas, cores de flores e frutos foram anotados. As amostras foram prensadas, herborizadas e secas em estufa elétrica a 60°C.

Figura 1–Amostra fértil da planta *Kalanchoe crenata (Andrews)Hawk*. Sitio Pedra Vermelha (22,319446 S; -42,300618 W, 634 msm), Boa Esperança da Cima, Lumiar, NF.

Posteriormente, amostra da planta foi registrada no Herbário da Faculdade de Formação de Professores da UERJ – FFP (campus São Gonçalo – RJ), com número de tombo: RFFP 20.519. A identificação do material se baseou na comparação das amostras coletadas, com o banco de dados da plataforma digital Reflora (Reflora - Herbario Virtual, 2024). A conferência do nome científico foi feita na plataforma Flora e Funga do Brasil (2024).

Obtenção do extrato das folhas de *Kalanchoe crenata(Andrews) Haw.*

Após recebidas as folhas, os talos foram removidos. As folhas danificadas e com manchas foram descartadas.A Fig. 2(a), mostra uma das folhas de Kc selecionada.

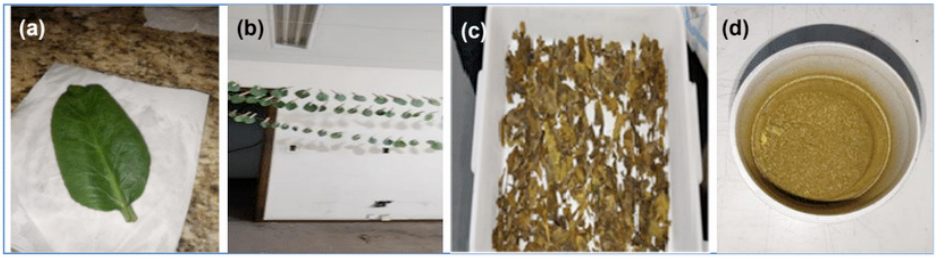


Figura 2 - (a) Folha de *Kalanchoe crenata (Andrews) Haw,* (b) folhas em processo de secagem; (c) folhas secas e trituradas; e (d) pó obtido por moagem.

Em seguida, as folhas foram lavadas cuidadosamente com água destilada e depois com água deionizada. As folhas lavadas foram secas a temperatura ambiente, em sala aereada e sem entrada de luz solar, onde foram dispostas individualmente em varais montados com essa finalidade, Fig. 2(b). Após 32 días, todas as folhas ficaram secas. As folhas foram então pesadas, trituradas manualmente, Fig. 2(c), e pulverizadas em um moinho analítico A11, IKA, com ciclos de 1 min por 10 min de descanso, gerando o pó de folhas de Kc.O pó obtido, Fig. 2(d), foi dissolvido em 100 ml de etanol e deixado em

repouso por 24 horas, a temperatura ambientes em contato com luz solar.Em seguida, o extrato processado foi filtrado e submetido à evaporação da fase alcoólica, com auxílio de evaporador rotatório 820, Fisatom, a temperatura de 60 °C e velocidade de rotação de 100 rpm, dando origem ao extrato seco, que foi pesado e armazenado em dessecador em ambiente escuro.

Caracterização do alginato de sódio, do pó e do extrato de folhas de *Kalanchoe crenata*

A estrutura química do alginato de sódio (Na-Alg),. do pó (p-Kc) e do extrato (E-Kc) das folhas de *Kalanchoe crenata (Andres) Haw* foi foi determinada por espectrometria FTIR, em espectrômetro Frontier, Perkin Elmer, na faixa de 600-4000 cm^{-1}, com resolução de 4 cm^{-1}. A estabilidade térmica foi determinada através de análise termogravimétrica (TGA), usando o analisador térmico simultâneo STA 6000, Perkin Elmer, em faixa de temperatura de 30-600°C, com taxa de aquecimento de 10°C/min e sob fluxo continuo de 20 ml/min de nitrogênio. Essas análises foram realizadas no Laboratório de Biomateriais do IPRJ.

A análise granulométricado p-Kc foi efetuada emagitador de peneiras SL–APG, 7Lab, usando quatro peneiras de abertura, 60, 100, 200 e 325 mesh,sob agitação de 20 minutos. Aperda por dessecação do E-Kc foi realizada pelo método gravimétrico, utilizando três (3) amostras de um (1) grama do extrato, inseridas em pesa-filtro previamente dessecado e tarado; e colocadas em estufa a 105 °C durante 2 horas, resfriadas em dessecador e posteriormente pesadas. Esse processo foi repetido até se obter peso constante.

Preparação dos filmes de alginato pela técnica de *casting*

Diversos testes foram realizados na procura das melhores condições de preparo dos filmes. A seguir, o procedimento escolhido para preparo dos filmes é descrito. Inicialmente, solução aquosa de glicerol, 3,37 g/100 ml H_20, foi preparada, sob agitação mecânica de 400 rpm, por 9 minutos. Posteriormente, 612 g de Na-Alg foram adicionados a essa solução,que foi mantida sob agitação a 900 rpm por 1 hora e meia. Após esse período, 10 ml de solução aquosa de $CaCl_2$, 1 g/100 ml, foram adicionados à solução de glicerol com alginato, mantendo as condições de agitação. A solução filmogênica obtida foi deixada por 2 horas,em repouso. Após esse período, alíquotas de 42 g da solução filmogênica foram depositadas em placas de petri (diâmetro, 14 cm) e secas a 40 ºC, por 24 horas,em estufa com circulação de arA035/1080 E, Marconi, obtendo-se os filmes pré-reticulados. Após essa etapa, 50 ml de solução de $CaCl_2$ (2%m/v) foram adicionados sobre cada filme, que foram mantidos revestidos pela solução por 5 minutos. Em seguida, os filmes foram lavados com água destilada e levados para secagem em estufa com circulação de ar, por 3 horas, a 40 °C. Os filmes curados obtidos foram mantidos em dessecador por 48 horas, com umidade controlada em 68%; e submetidos posteriormente à caracterização das propriedades mecânicas em tração e determinação da espessura.

Caracterização dos filmes de alginato de sódio.

A espessura dos filmes foi determinada com micrômetro digital QuantuMike, Mitutoyo, de escala de 0,001 mm, e reportada como a média relativa a espessura de 5 pontos escolhidos de forma aleatória.As propriedades mecânicas dos filmes foram determinadas,através de ensaios de tração (ASTM 882) em máquina de ensaios universal Autograph Ag-X Plus, 100 kN, Shimadzu,com corpos de prova deformato retangular (80mm de comprimento por 20 mm de largura), célula de carga de 5kN e velocidade de deslocamento da travessa móvel de 10mm/min, a temperatura ambiente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Espectrometria FTIR

A Fig. 3 mostra o espectro do alginato de sódio e as suas bandas características.

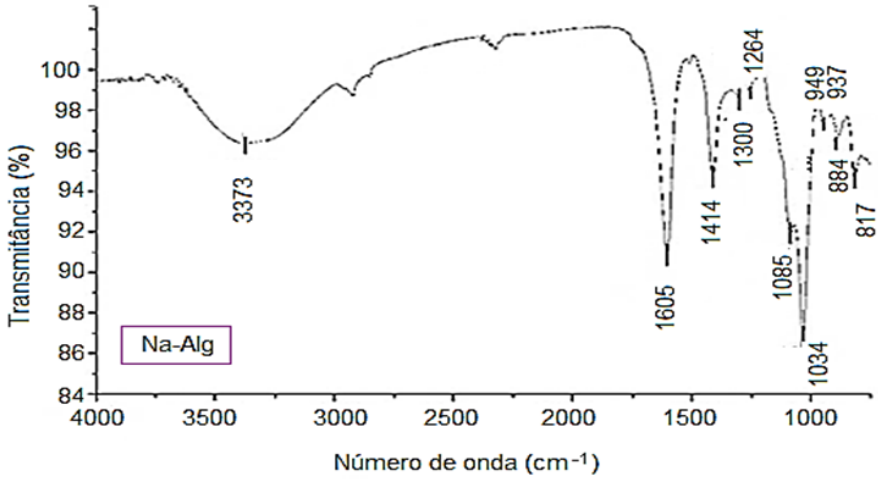


Figura 3 - Espectro FTIR do alginato de sódio

A banda em 949 cm^{-1} é atribuída a vibrações de estiramento C-O dos resíduos dos ácidos urônicos(Soares *et al.*, 2005). A banda em 884 cm^{-1} é característica das vibrações de deformação axial C-H dos resíduos β-D do ácido manurônico (Huamani-Palomino *et al.*, 2021; Jiao *et al.*, 2019).

De acordo com as considerações de Millán-Olvera (2020), a razão entre a absorbância em 1300 cm^{-1}e 264 cm^{-1}, respectivamente iguais a 0,136 e 0,091, foram utilizadas para avaliação da razão M/G,entre os ácidos manurônico (M) e gulorônico (G). O valor obtido,1.5, caracteriza um alginato gerador de géis flexíveis (Figueira *et al.*, 2014).

Na Figura 4 (a,b) são apresentados os espectros FTIR do pó e do extrato de folhas de Kc. Ambos os espectros do p-Kc e do E-Kc apresentam ampla banda relacionada aos grupos hidroxila, em 3346 cm^{-1} (p-Kc) e em 3322 cm^{-1} (E-Kc), respectivamente.

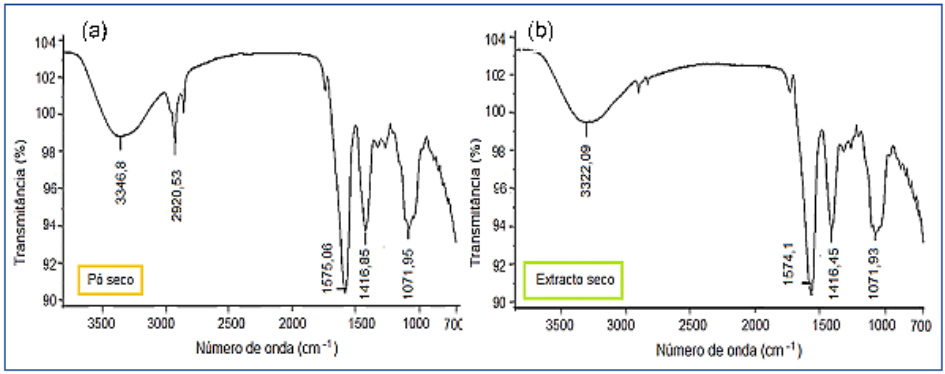


Figura 4 – Espectro FTIR do pó (a) e do extrato (b) das folhas de Kalanchoe crenata.

A banda em 2920 cm^{-1} , corresponde à vibração simétrica C-H do CH_3) e é associada a lípidos e flavonoídes (Matzuura *et al.*; 2019). A presença de poliflavonóides, é confirmada pelo surgimento de bandas na região de 1722-1400 cm^{-1} e ao redor de 1000 cm^{-1}, atribuídas as vibrações C=C dos anéis aromáticos e as vibrações de estiramento –C=O. Estudos tem revelado a presença predominante de flavonóides na constituição da *Kalanchoe* (SILVA, 2009). Outras análises serão necessários para determinar a composição fitoquímica do material.

O espectro do extrato (E-Kc) é bastante similar ao do pó (p-Kc), entretanto, as bandas são de menor intensidade. Essa redução de intensidade é bastante evidente na banda em 2920 cm^{-1}. Rawdan-Praglowska (2021) observaram também essas diferenças de intensidade, quando compararam os espectros de folhas e extratos comerciais de *Kalanchoe pinnata,* espécie do mesmo género que a *K. crenata*, também utilizada na medicina popular.

Analise termogravimétrica

A Figura 5, apresenta os termogramas obtidos para o Na-Alg;e para o pó (p-Kc) e extrato (E-Kc) de folhas de K. crenata.

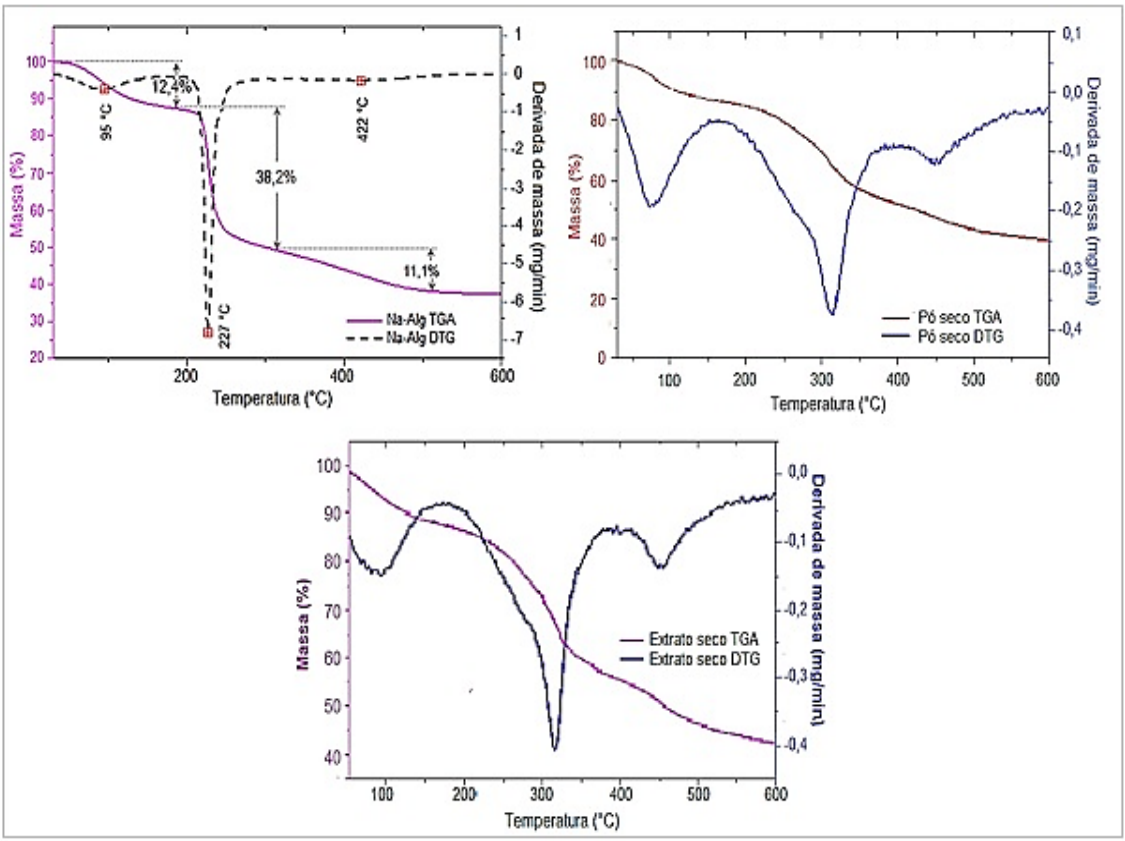


Figura 5 - Curvas TGA/DTG do alginato de sódio (a); pó (b) e extrato de folhas (c) de Kalanchoe crenata, obtidas com razão de aquecimento 10°C/min até 800 °C e vazão deitrogênio 20 ml/min.

O alginato de sódio apresenta três eventos de perda de massa; desidratação, decomposição e formação de Na_2CO_3; e carbonização do material (Soares, *et al.* 2005). A desidratação, do alginato usado neste estudo, ocorre na faixa de temperatura de 43-186 °C com perda de massa de 12,4%, e temperatura da máxima velocidade de perda de massa ao redor dos 95 ºC. A ampla extensão da faixa de temperatura de desidratação se deve a ruptura das ligações intermoleculares do tipo hidrogênio, observadas no espectro FTIR entre 3000-3400 cm^{-1}.

A decomposição do alginato ocorre entre 202 °C e 580 °C, e a formação de Na_2CO_3 ocorre em torno de 600 °C (Soares et al., 2005). Neste trabalho, o segundo evento de perda de massa ocorre entre 186-314°C e o terceiro evento ocorre entre 314-511 °C, com perdas de massa de ~38,2% e 11%, respectivamente. Provavelmente, o terceiro evento está ligado à formação do carbonato de sódio. Análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) será efetuada e poderá dar maiores indicações sobre esse resultado.Os termogramas do p-Kc e E-Kc mostram também três regiões de perda de massa.

Na Tabela 1, os eventos de perda de massa em função da temperatura que foram identificados na análise das curvas dos termogramas do Na-Alg, p-Kc e E-Kc são apresentados de forma resumida.

Material	**Intervalo de temperatura**(ºC)	***Tm***(ºC)	**Perda de massa**(%)
Na-Alg	43 -186	95,15	12,4
	186-314	226,85	38,2
	314-511	421,75	11,1
	Resíduo a 600 ºC, 37,3%		
p-Kc	40 -164	73,75	13,4
	164-384	315,53	33,2
	344-592	449,2	13,5
	Resíduo a 600 ºC, 39,5%		
E-Kc	31 -175	95,14	12,5
	175-396	317,74	31,7
	396-592	455,28	13,8
	Resíduo a 600 ºC, 42%		

Na-Alg: alginato de sódio; Kc: *Kalanchoe crenata (Andrews) Haw*; p-Kc: pó das folhas de Kc ;E-Kc: extrato das folhas de Kc; **Tmv**: temperatura na qual a velocidade de degradação é máxima.

Tabela 1 - Comportamento térmico do alginato de sódio e do pó e extrato de Kc

Análise granulométrica do p-Kc,rendimento e perda por dessecação do E-Kc

Observa-se na Fig. 6, que após peneiramento, aproximadamente 21% das partículas de pó da *Kalanchoe crenata (Andrews) Haw* passaram pela peneira com abertura nominal de 0,250 mm (60 mesh), o que caracteriza esse pó, como moderadamente grosso (Anvisa, 2019, p.123). O tamanho de partícula está relacionado com a solubilidade do pó. Partículas grosseiras podem retardar a penetração do solvente. Pó fino tende a formar aglomerados que também interferem na penetração do solvente (Fonsêca, 2005, p.10).

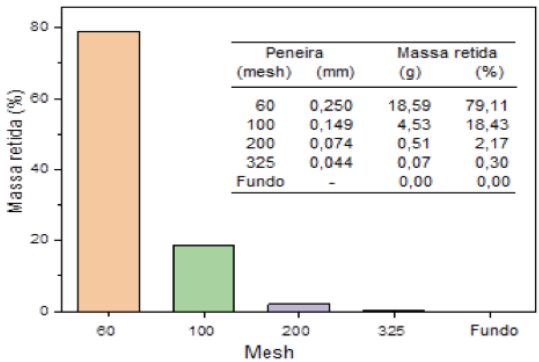


Figura 6 - Porcentagem de pó retida em cada peneira.

O conteúdo de água na matéria prima vegetal deve ser baixo, para evitar proliferação de fungos e reações que possam levar a degradação do material. Segundo a farmacopeia, o valor máximo permitido é de 14 % (Cavalcante *et al.*, 2017). Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos na medição da perda por dessecação do E-Kc.

Amostra	***Pu*** (g)	***Pa*** (g)	
1	32,459	1,001	32,332
2	31,172	1,005	31,057
3	33,103	1,004	32,985
	Media		11,96
	Desvio padrão		0,53

Pu: massa do conjunto pesa filtro+ amostra; ***Pa***: massa da amostra; ***%Pd***: porcentagem de perda por dessecação.

Tabela 2 - Perda por dessecação do extrato das folhas de Kalanchoe crenata

O rendimento do extrato foi calculado, de acordo com a fórmula, Eq. 1,

$$Re = \left({}^{M_{es}}/_{M_i}\right) \times 100 \quad (1)$$

onde: M_{es} é a massa do extrato seco igual a 19,61 g e M_i é a massa inicial das folhas igual a 0,4 g.

O rendimento total do extrato calculado foi de 2,4%, valor bastante baixo relacionado como alto teor de água nas folhas de Kc,característica comun das suculentas (Rodrigues *et al.*, 2011). A massa das folhas secas foi de 28,09 g, resultando em perda de massa de 96,5%.

Espessura e propriedades mecânicas dos filmes de alginato de sódio (Na-Alg)

A espessura dos filmes na Tabela 3 está dentro do padrão esperado para curativos. Esses valores devem ser inferiores à espessura da pele humana (0,5 - 2 mm) para proporcionar um maior conforto ao paciente. (Sobczyk, 2020).

Filme	**Espessura** (mm)	σ_{max} (MPa)	σ_{rup} (MPa)	ε_{rup} (%)	***E*** (MPa)
Controle	0,15 ± 0,06	1,2 ± 0,7	1,2 ± 0,7	53.0 ± 11,0	2,2 ± 1,1
Curado	0,11 ± 0,05	13,1 ± 5,0	13,1 ± 5.0	22,7 ± 15,6	138,2 ± 126,8

σ_{max}: máxima tensão - σ_{rup}: tensão na ruptura - ε_{rup}: deformação na ruptura - ***E***: módulo elástico

Tabela 3 – Valores obtidos para a espessura e propriedades mescánicas dos filmes

Observa-se que o filme curado apresenta redução da espessura; aumento no módulo elástico em tração, (*E)*, na resistência máxima a tração, (σ_{max}.),e na resistência na ruptura (σ_{rup}), e redução no alongamento da ruptura, em relação as propriedades do filme

de controle. Esse comportamento é decorrente do fenômeno de reticulação das cadeias poliméricas produzido pela a inserção de Ca^{++} entre os grupos carboxílicos do alginato, reduzindo a distância entre as cadeias e entravando o movimento das mesmas (Turbiani *et al*., 2011).

Considerando o erro das medidas, o filme curado apresenta valor de resistência similar ao reportado para a pele, 17,66 MPa (Alves *et al*., 2015);e módulo maior do que os valores reportados na literatura, faixa de 4,6-83,3 MPa (Figueira, 2016). Em relação ao alongamento na ruptura, apesar do decréscimo observado, os valores se encontram dentro da faixa reportada de 35 a 115% (Figueira *et al*, 2016).

CONCLUSÕES

O pó e o extrato das folhas de *Kalanchoe crenata* apresentam granulometria e perda por dessecação similares as reportadas para plantas medicinais, de acordo com a farmacopeia. A estrutura química e comportamento térmico do pó e do extrato das folhas de *Kalanchoe* crenata são muito similares, evidenciando a presença de flavonoídes, compostos com atividade anti-inflamatória. Outros análises são necessárias para verificar a presença e concentração desses ou outros metabólitos com atividade terapêutica. O alginato de sódio também apresenta propriedades estruturais e químicas concordantes com os reportados em outros estudos. Os filmes de alginato curados apresentam propriedades mecânicas próximas às reportadas para a pele, comportamento que é esperado para todo curativo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro outorgado pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ). Agradecem também á proprietária do sitio Pedra Vermelha, Sra. Diva Passo de Azevedo, pela doação dos exemplares de *Kalanchoe crenata (Andrews) Haw* para o desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

AKINSULIRE, O. *et al*. In vitro antimicrobial activity of crude extracts from plants Bryophyllum pinnatum and Kalanchoe crenata. **African Journal of Traditional, Complementary, and Alternative Medicines**, v. 4, n. 3, p. 338–44, fev. 2007.

ALVES, A. *et al.* Avaliação microscópica, estudo histoquímico e análise de propriedades tensiométricas da pele de tilápia do Nilo. **Revista Brasileira de Queimaduras**, ISSN on line 2595-170X, v. 14, n. 3, p. 203–210, set. 2015. Disponivel em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/16376>. Acesso em: 05 fev. 2024.

AMUTHA, K. Development of Film Using Biopolymer and Herbal Extract for Biomedical Application. **International Journal of Textile Science & Engineering**, TSE-101, jul. 2017. DOI: 10.29011/TSE-101/100001.

DE ARAÚJO, E. R. *et al.* Local anti-inflammatory activity: Topical formulation containing *Kalanchoe brasiliensis* and *Kalanchoe pinnata* leaf aqueous extract. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 113, p. 108721, may. 2019. DOI: 10.1016/j.biopha.2019.108721.

ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Farmacopeia Brasileira.** 6a. ed**.** Brasilia: ANVISA, v. 1, p. 123, 2019.

BUENO, R. S. **Desenvolvimento de filmes funcionais incorporando extrato de *Acmella oleracea* para fins cosméticos e antimicrobiano**. Dissertação (Mestrado em Inovação Tecnológica) – Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba - MG, 2019.

CAVALCANTE, *et al.* **Estudo farmacognóstico das folhas de Kalanchoe pinnata**. 57ºCBQ. **Anais**... In: 57º Congresso Brasileirode Química. Gramado - RS: Associação Brasileira de Química, 2017.

DE ARAÚJO, E. R. *et al.* Local anti-inflammatory activity: Topical formulation containing *Kalanchoe brasiliensis* and *Kalanchoe pinnata* leaf aqueous extract. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 113, p. 108721, may. 2019. DOI: 10.1016/j.biopha.2019.108721.

DIAS, M. R.; LEÃO, R. C.; COSTA, H. D. S. Obtenção e caracterização de microesferas de alginato/vidro bioativo. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia** - ISSN: 1984-5693, v. 12, p. 122-137, set. 2020. DOI: 10.22407/1984-5693.2020.

FIGUEIRA, D. R. et al. Production and characterization of polycaprolactone- hyaluronic acid/chitosan-zein electrospun bilayer nanofibrous membrane for tissue regeneration. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 93 (Pt A), p. 1100–1110, dez. 2016. DOI: 10.106/j.ijbiomac.2016.09.080

FIGUEIRA, F. C.; HOTZA, D.; BERNARDIN, A. M. Obtenção de granilhas por gelificação de suspensões cerâmicas.**Cerâmica**, v.60, n.56, p. 457–464, dez. 2014. DOI:10.1590/SO366-69132014000400002.

FLORA E FUNGA DO BRASIL. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/> Acesso em: 05 fev. 2024.

FONSECA, Z. A. Saiâo, *Kalanchoe brasiliensis Camb*. Plantamed - Plantas e ervas medicinais e fitoterápicos**, © 2005.** Disponível em: <https://www.plantamed.com.br>. Acesso em: 05 fev. 2024.

FONSÊCA, S. G. DA C. **Farmacotécnica de fitoterápicos**. Ceará: Universidade Federal do Ceará, 2005, p. 10. Disponível em: <https://farmacotecnica.ufc.br/wp-content/uploads/2019/11/farmacot-fitoterapicos.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2024.

GBIF - Global Biodiversity Information Facility. *Kalanchoe crenata (Andrews) Haw*. Disponível em: https://www.gbif.org/pt/species/6441622. Acesso em: 05 fev. 2024.

GOEBEL, G.; CADDAH, M. K.; GIUFFRE P.M.W. *Crassulaceae*. **Flora e Fauna do Brasil.** Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/>. Acesso em. 05 fev. 2024.

GOMES, D. DO N. **Desenvolvimen, to e caracterização de filmes de Alginato incorporados com extratos de Anadenanthera colubrina (Vell.) Brenan visando o desenvolvimento de substituto temporário de pele**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

GREENME. Saião, uma planta medicinal para gastrite e muito mais!, 16 ago. 2017. Disponível em: <https://www.greenme.com.br/consumir/usos-beneficios> Acesso em: 5 fev. 2024.

HUAMANI-PALOMINO, R. G. *et al.* Functionalization of Alginate-based material by oxidation and reductive amination. **Polymers**, v. 13, n. 2, p. 255, jan. 2021. DOI: 10.3390/polym13020255.

JIAO, W. *et al.* Effects of molecular weight and guluronic acid/mannuronid acid ratio on the rheological behavior and stabilizing property of sodium alginate. **Molecules**, v. 24, n. 23, p. 4374, nov. 2019. DOI: 10.3390/moléculas24234374.

MATZUURA, E. N.; SAKANE, K. K, SIMIONI, A. R. Espectroscopia no infravermelho como ferramenta para diferenciação de chá verde de agricultura orgânica e convencional. **Revista Tecnologia e Tendências**, v.10, n. 2, p. 59-74, dez. 2019. DOI: 10.25112/rtt.v10i2.1968.

MEDEIROS, M. F. T.; FONSECA, V. S.; ANDREATA, R. H. P. Plantas medicinais e seus usos pelos sitiantes da Reserva Rio das Pedras, Mangaratiba, RJ, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 18, n. 2, p. 391–99, jun. 2004. DOI: 10.1590/S0102-33062004000200019.

MILLÁN-OLVERA, B. M. *et al.* Obtención y caracterización de perlas de Alginato-imidacloprid y alginato-bifentrina. **Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theorical and Applied Cgemistry**, v. 77, n. 590, p. 109-117, 2020. Disponível em: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/371257>. Acesso em: 05 fev. 2024.

PEIXOTO, A. L.; MAIA, L. C. (org.). **Manual de Procedimentos para Herbários**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2013. ISBN 978-85-415-0267-2.

PEREIRA, R.; MENDES, A.; BÁRTOLO, P. Alginate/Aloe Vera Hydrogel Films for Biomedical Applications. **Procedia CIRP**, v. 5, p. 210–215, 2013 a.

PEREIRA, R. *et al.* Development of novel alginate based hydrogel films for wound healing applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 52, p. 221–230, jan. 2013b. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2012.09.031.

REFLORA – Hervário Virtual. Disponível em: <https://reflora.jbrj.gov.br/reflora/herbarioVirtual/>. Acesso em: 5 fev. 2024.

RADWAN-PRAGLOWSKA, J. *et al.* Fungal Chitosan-derived biomaterials modified with Kalanchoe pinnata as potential hemostatis agents-developement and characterization. **Polymers**, v. 13, n. 8, p. 1300, abr. 2021. DOI: 10.3390/polym13081300.

RIBEIRO, G. D. **Algumas espécies de plantas reunidas por famílias e suas propriedades**. 1ª ed. Porto Velho – RO: Embrapa Rondonia, 2010. p. 87, 179 p.

RODRIGUES, G. A. *et al.* Evaluation of the physicochemical and antibacterial properties of films based on biopolymers incorporating *Zingiber officinale* extract. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e618986199, jul. 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i8.6199.

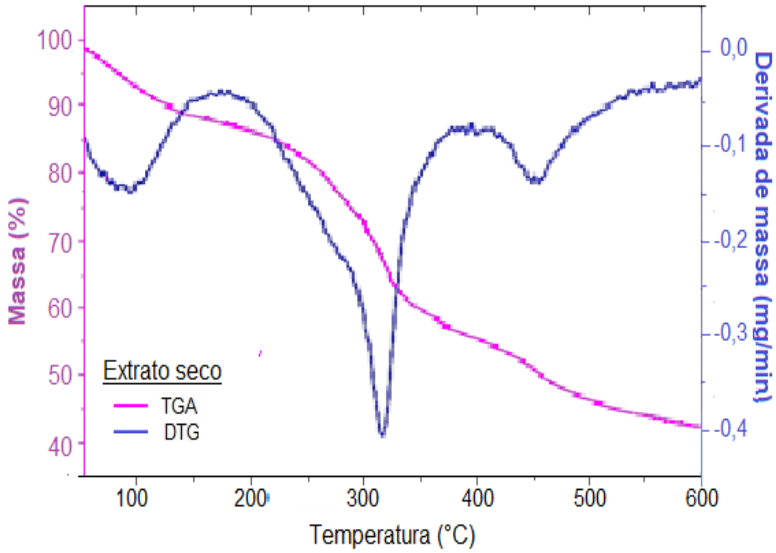
RODRIGUES, T. S. *et al.* Métodos de secagem e rendimento dos extratos de folhas de Plectranthus barbatus (boldo-da-terra) e P. ornatus (boldo-miúdo). **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 13, especial, p. 587–590, may. 2011. DOI: 10.1590/S1516-05722011000500014.

SILVA, J. G. *et al.* Atividade Inibitória das folhas e caule de Kalanchoe brasiliensis cambess frente a microrganismos com diferentes perfis de resistência a antibióticos. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 19, n. 3, p. 790–794, set. 2009. DOI:10.1590/S0102-695X2009000500024.

SOARES, J. P. *et a*l. Thermal behavior of alginic acid and its sodium salt. **Eclética Química**, v. 29, n. 2, p. 57–64, jan, 2005. DOI: 10.1590/S0100-46702004000200009.

SOBCZYK, A. DE E. **Desenvolvimento de filmes compostos de quitosana e alginato contendo folhas de orégano ou óleo essencial de orégano para aplicação como curativo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Quimica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Química Universidade Federal Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2020.

TURBIANI, F.R.B. *et al*. Liberação de benzoato de cálcio de filmes de alginato de sódio reticulados com íons cálcio. **Polímeros**, v. 21, n. 3, p. 175–181, jun. 2011. DOI: 10.1590/S0104-14282011005000034.



HENRIQUE AJUZ HOLZMANN: Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutor em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

GÉSSICA KATALYNE BILCATI: Professora do Curso de Engenharia Civil na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Guarapuava. Possui Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Materiais e Componentes de Construção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Curitiba. Desenvolveu pesquisas relacionadas à painéis cimento-madeira. Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), na área de compósitos cimentícios com adição de materiais celulósicos.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Alginatos 317

Arquitetura 51, 52, 56, 57, 59, 62, 72, 73, 74, 75, 110, 165, 311

B

Baterias 123, 124, 125, 127, 128, 129, 130, 132, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 152, 153, 154, 155, 157

Biocarvão 86, 89, 90, 96

Biocimentação 76, 77, 78, 79, 81, 83

Blockchain 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122

C

Coeficiente de descarga 209, 212, 213, 214, 215

Comércio 13, 35, 61, 64, 73, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 119, 120, 307, 310, 315, 316

Construção civil 12, 13, 14, 15, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 42, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 60, 61, 65, 72, 73, 75, 76, 77, 78, 82, 208

Container 51, 52, 53, 56, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 73, 74, 75, 263

Curativos 317, 318, 319, 326

Curva de pato 123, 124, 125, 126, 127, 128, 130, 131, 132, 133, 134, 135

D

Drenagem 86, 87, 88, 89, 91, 96, 97

E

Economia de água 160, 161, 164

Educação matemática 286

Engenharia florestal 298, 300, 301, 302

Ensino 40, 46, 52, 61, 67, 71, 72, 74, 194, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 295, 296, 298, 300, 301, 303

Estações de recarga 151, 155

Exportação 98, 99, 100, 104, 105, 110, 112, 113, 114, 115, 117, 120

Extrato vegetal 317

G

Geração fotovoltaica 123, 124, 130, 134

H

Hidráulica 125, 209, 213, 217

Hidrômetro 160, 161, 162, 163

I

Inovação 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 49, 50, 52, 98, 100, 102, 103, 107, 111, 113, 116, 139, 288, 327

L

Lean Six Sigma 1, 2, 11

M

Manutenção 1, 4, 10, 41, 43, 62, 65, 153, 164, 208, 234

Matemática 46, 137, 286, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 295, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303

Material didático 293, 298, 300, 301

Mobilidade elétrica 137, 138, 140, 143, 151, 152, 153

Motor 130, 200, 214, 236, 237, 238, 239, 240, 244, 245, 246

O

Otimização 2, 1, 98, 99, 104, 110, 116, 120, 146, 155, 156, 216

P

Planejamento estratégico 160, 165

Propelente 236, 237, 239, 246

Propulsão 236, 246

R

Refrigeração 218, 219, 220, 221, 222, 234, 235, 236, 237, 238

Remediação 86, 89, 95, 97

Reutilização 51, 52, 53, 54, 56, 58, 71, 72, 75, 89

Robótica 38, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 48, 49

S

Sistemas de energia 150, 151, 155, 157, 158

Solução 10, 15, 48, 50, 67, 78, 79, 80, 81, 92, 93, 103, 104, 113, 114, 117, 120,

124, 127, 128, 135, 141, 157, 160, 164, 186, 188, 189, 219, 221, 293, 319, 321

Startups 12, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 112, 260

Sustentabilidade 13, 37, 44, 45, 51, 52, 54, 56, 60, 63, 72, 75, 151

T

Técnicas sustentáveis 76, 77

Troca de calor 236, 239, 241, 242, 245, 246

U

Urânio 86, 96, 97

V

Veículos elétricos 137, 138, 148, 150, 151, 152, 155, 158, 159

Vertedor 209, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217

ENGENHARIAS

desafios e soluções nas múltiplas fronteiras do conhecimento

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Atena Editora
Ano 2024

ENGENHARIAS

desafios e soluções nas múltiplas fronteiras do conhecimento

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Atena Editora
Ano 2024